

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 747

ISSN 1213-418X

Tomáš Mauder

**DIGITÁLNÍ DVOJČE
PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI
A JEHO OPTIMALIZACE**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

Ing. Tomáš Mauder, Ph.D.

DIGITÁLNÍ DVOJČE PLYNULÉHO ODLÉVÁNÍ OCELI
A JEHO OPTIMALIZACE

DIGITAL TWIN OF CONTINUOUS STEEL CASTING
AND ITS OPTIMIZATION

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE
V OBORU KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ



BRNO 2022

KLÍČOVÁ SLOVA

Digitální dvojče, optimalizace procesu, výroba oceli, ekologická stopa.

KEYWORDS

Digital twin, process optimization, steel production, ecological footprint.

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Kompletní verze habilitační práce je uložena na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

© Tomáš Mauder, 2023

ISBN 978-80-214-6132-1

ISSN 1213-418X

Obsah

Představení autora	4
1 Úvod	5
1.1 Vývoj průmyslu	5
1.2 Ekologická perspektiva	6
1.3 Hutnický průmysl	7
1.4 Digitální dvojče a jeho význam	9
2 Digitalizace zařízení pro plynulé odlévání	11
2.1 Proces výroby oceli	11
2.2 Kvalita oceli a faktory, které ji ovlivňují	12
2.3 Digitální dvojče ZPO	13
2.4 Nelinearity digitálního dvojčete ZPO	17
2.5 Validace digitálního dvojčete ZPO	20
3 Využití digitálního dvojčete a jeho optimalizace	23
3.1 Optimization of Quality of Continuously Cast Steel Slabs by Using Firefly Algorithm	25
3.2 Optimal Control Algorithm for Continuous Casting Process by Using Fuzzy Logic .	26
3.3 Assessment of Basic Approaches to Numerical Modeling of Phase Change Problems — Accuracy, Efficiency, and Parallel Decomposition	27
3.4 High Quality Steel Casting by Using Advanced Mathematical Methods	28
3.5 Comparison of optimization-regulation algorithms for secondary cooling in continuous steel casting	29
3.6 Dry cooling as a way toward minimisation of water consumption in the steel industry: A case study for continuous steel casting	30
3.7 Reduction of CO2 Emissions in Steelmaking by Means of Utilization of Steel Plant Waste Heat to Stabilize Seasonal Cooling Water Temperature	32
4 Závěr	34
Literatura	37
Abstrakt	42

Představení autora



Autor práce Tomáš Mauder vystudoval magisterský obor Matematické inženýrství na FSI VUT v Brně. V rámci magisterského studijního programu absolvoval semestrální pobyt na Molde University College, v Norsku se specializací na logistiku a optimalizaci. Uchazeč dále pokračoval v doktorském studiu na Energetickém ústavu na Odboru Termomechaniky a Techniky Prostředí, kde působí dodnes. Na doktorském studijním programu Inženýrská mechanika úspěšně obhájil v roce 2012 dizertační práci na téma Optimalizace brambového plynulého odlévání oceli za pomoci numerického modelu teplotního pole.

V rámci doktorského studia i po jeho skončení uchazeč spolupracoval na řešení řadě domácích i evropských projektů (GAČR, COST, OPVTV), již za dobu studia vystupoval jako vedoucí několika juniorských projektů FSI VUT v Brně. Podílel se rovněž na výzkumných projektech pro průmyslové partnery, zejména v hutním průmyslu (EVRAZ Vítkovice Steel, Třinecké železářny, Železářny Podbrezová, aj.). V roce 2014 vytvořil speciální numericko-optimalizační software pro simulaci unikátního zařízení pro plynulé odlévání pro Jihokorejskou firmou POSCO. V roce 2016 potom pro firmu Bosch Jihlava vytvořil matematický simulační model založený na teorii front pro konkrétní výrobní linku za účelem její optimalizace a optimálního plánování servisních operací. Uchazeč se rovněž věnuje pedagogické praxi, tedy výuce a vedení závěrečných magisterských a bakalářských prací se zaměřením na termomechaniku, techniku prostředí, numerickou matematiku a optimalizaci. Uchazeč aktivně publikuje, v databázi Thomson Reuters má 55 publikací, počet citací bez autocitací 130 s h-indexem = 9. V databázi Scopus má 60 publikací, které jsou 168-krát citovány bez autocitací a h-index = 10. Uchazeč rovněž vypracovává posudky na projekty pro TAČR a MPO a recenze v odborných časopisech.

Od roku 2011 po současnost je Tomáš Mauder zaměstnán na VUT FSI jako výzkumný pracovník a od roku 2019 jako odborný asistent (akademický pracovník) na Energetickém ústavu FSI. Od roku 2017 je částečně zaměstnán na rektorátu VUT jako Manažer transferu technologií.

Kapitola 1

Úvod

1.1 Vývoj průmyslu

Průmyslovou revoluci lze popsat jako postupnou změnu v hospodářství a průmyslu, kdy díky pokroku ve vědě a technice dojde k zásadní změně v zemědělství, výrobě, těžbě, dopravě a dalších hospodářských sektorech. Zejména se tato změna týká ulehčení náročné práce lidí, snížení nákladů a maximalizaci možných zisků [33].

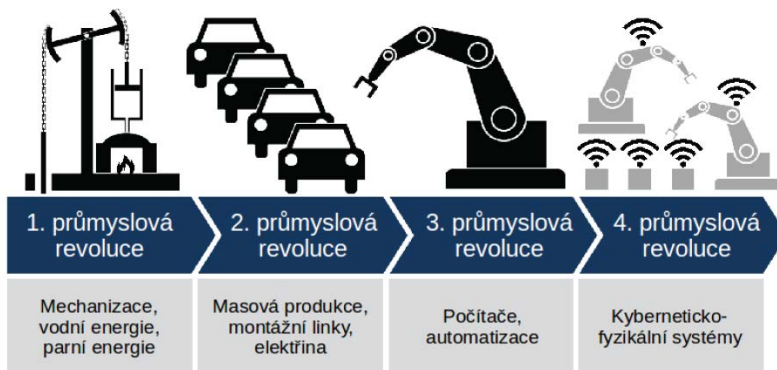
První průmyslová revoluce probíhala v 18. a 19. století, po zdokonalení parního stroje Jamesem Wattem. Začaly se využívat dosud nevyužívané zdroje energie, jako je uhlí, které pro parní stroj zajistilo výrobu páry. Do této doby v hospodářství dominovalo zemědělství, které bylo postupně nahrazováno výrobním průmyslem. Dosud využívaná manufakturní výroba začala být nahrazována strojovou velkovýrobou. Na kvalitu výrobních strojů byly kladeny čím dál tím vyšší požadavky, a tak se neustále rozvíjel i nový obor strojírenství. Protože na výrobu součástí strojů byl využíván kov, pokrok v technice se musel projevit i v hutní výrobě. Vznikly vysoké pece, ve kterých se dosahovalo mnohem vyšších teplot a tavba železné rudy tak byla kvalitnější. Rovněž muselo nutně dojít k velkým změnám v dopravě, kdy koně a povozy již nestačily na dopravu výrobních surovin, což vedlo k vynálezu parní lokomotivy a parní lodi [22].

Druhou průmyslovou revolucí nazýváme období následující po první průmyslové revoluci na konci 19. a na počátku 20. století. Je označována za revoluci technickovědeckou a je zejména spojována s objevem elektrické energie. Mezi zásadní vynálezy lze uvést telefon Alexandera Grahama Bella, žárovku Thomase Alva Edisona, dynamit Alfreda Nobela a díky spalovacímu motoru mohl Henry Ford dát impuls k rozmachu automobilové výroby. Začaly se využívat ve výrobě nové materiály, což přineslo nové výrobní procesy a masovou výrobu zavedením montážních výrobních linek. Druhou průmyslovou revolucí byl ovlivněn rovněž ocelářský průmysl, který musel na novou poptávku reagovat rozmanitější a kvalitnější produkcí oceli [22].

Počátek třetí průmyslové revoluce bývá označován rok 1969, kdy vznikl první paměťový programovatelný logický počítač (zkratka PLC) [54]. Toto období se nese v duchu aplikace informační technologie, elektroniky a automatizace výroby. Od té doby lidstvo pokročilo o další kus kupředu k automatizaci celých výrobních procesů. Jako příklad lze uvést roboty vykonávající naprogramované sekvence operací bez potřeby zásahu člověka. Mezi zásadní objevy patří vznik internetu, bez kterého se dnes již neobejde žádná domácnost [22]. Automatizace a elektronika prostoupila výrobní ocelářské podniky a vedla k výraznému zvýšení produktivity výroby. Tento trend však dostatečně nezachytila produkce oceli ve východním bloku, kde nedocházelo k obměně investic, což vedlo k zastaralosti strojů a ztrátě konkurenceschopnosti.

V současné době jsme svědky čtvrté průmyslové revoluce označované Průmysl 4.0 (angl. Industry 4.0) spojené s digitalizací a pokročilou automatizací/optimalizací výroby a změnami na pracovním trhu [56]. Koncept Průmyslu 4.0, představeného na veletrhu v Hannoveru v roce 2013, je založen na vytvoření „Chytrých továren“ využívající kyberneticko-fyzikální systémy a jejich komunikaci přes tzv. IoT – Internet of Things, což označuje síť pro decentralizované řízení. V praxi to pak znamená, že zařízení ve výrobním procesu se mohou sama rozhodovat na základě dat, které mají ze senzorů,

kamer a cloudového úložiště. Dnešní výrobní proces je spojen s novými metodami strojového učení, autokonfigurace a autodiagnostiky, se kterou může komunikovat vzdálená obsluha přes internet. Dále se budou využívat cloudová úložiště, 3D tisk a chytrá datová centra. Průmyslu 4.0 přinese zánik některých pracovních míst, ale nová zase vzniknou, proto je nutné změnit i systém vzdělávání [11]. Grafické znázornění průmyslových revolucí je zobrazeno na obrázku 1.1.



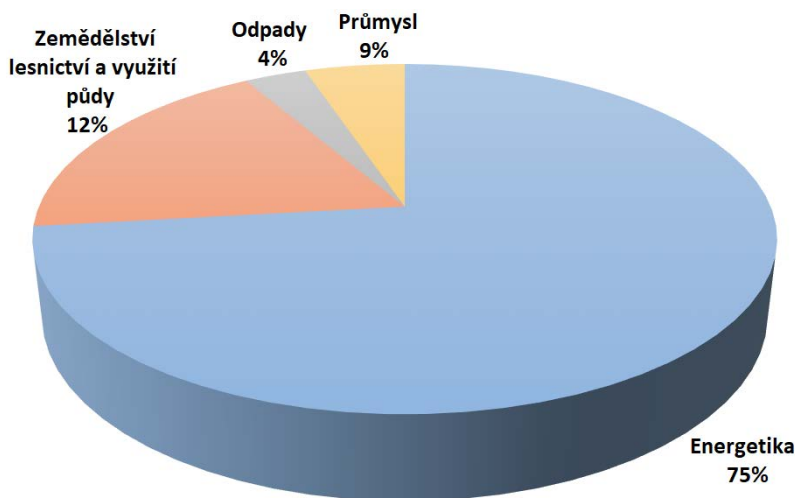
Obrázek 1.1: Grafické znázornění průmyslových revolucí [8]

1.2 Ekologická perspektiva

Mohutný rozvoj průmyslu však sebou přinesl i řadu pro naši planetu negativních důsledků. Právě průmyslová výroba, na které je současná civilizace v podstatě závislá, je jedním z hlavních znečišťovatelů životního prostředí [11]. Průmysl na jedné straně zabezpečuje ekonomický rozvoj a růst životní úrovně člověka, na straně druhé znehodnocuje kvalitu životního prostředí jak pro sebe, tak pro ostatní organismy, které připravuje o čistý vzduch, vodu a půdu [18]. Na životní prostředí se nebraly žádné ohledy, jeho katastrofální stav byl zlehčován nebo dokonce před veřejností utajován. Koncem 80. let minulého století ale již nebylo pochyb, že se jedná o vážný problém. Po roce 1990 dochází k rozsáhlé transformaci průmyslu, kterou doprovází snižování jeho zátěže na životní prostředí a první environmentální politika. Rovněž se začalo hovořit u účinku tzv. skleníkových plynů, který byl plně vyčíslen v roce 1896 švédským vědcem Svantem Arrheniusem, který provedl první kvantitativní odhad globálního oteplování Termín „skleníkový efekt“ byl poprvé použit švédským meteorologem Nilssem Gustafem Ekholmem v 1901 [17].

Skleníkové plyny vyskytující se v atmosféře země přispívají ke skleníkovému efektu, což je proces, při kterém tyto plyny v atmosféře způsobují ohřívání planety tím, že pohlcují dopadající sluneční záření a zároveň brání jeho zpětnému odrazu do vesmíru. Zatím co přirozený skleníkový efekt je rozhodující pro zachování života na Zemi, antropogenní skleníkový efekt způsobený lidskou činností zvyšuje koncentrace zejména oxidu uhličitého (CO₂) v atmosféře na takovou úroveň, že dochází k postupnému ohřívání planety [27]. Ve 20. století došlo ke zvýšení průměrné teploty o 0,6 °C. V případě, že by došlo ke zvýšení teploty o 2 °C, lze očekávat vážné následky v podobě podstatných změn klimatu. Důsledkem potom může být tání ledovců, zvýšení hladiny oceánů spojené se záplavami, některá místa na planetě by mohli být v budoucnu neobyvatelná v důsledku rozšiřování pouští a bude docházet k vymírání živočišných druhů v oceánech i na souši.

V roce 1997 byl přijat Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu [27]. Země úmluvy se v protokolu zavázaly do konce prvního kontrolního období (2008 - 2012) snížit emise skleníkových plynů nejméně o 5,2 % ve srovnání s předindustriálním stavem v roce 1990. V prosinci 2012 byl schválen dodatek, kterým bylo potvrzeno pokračování Kjótského protokolu a jeho druhé kontrolní období, které bylo stanoveno na osm let (2013 – 2020). EU a jejích 28 členských států se zavázalo snížit do roku 2020 emise skleníkových plynů o 20 % v porovnání s rokem 1990. Kjótský



Obrázek 1.2: Globální produkce emisí skleníkových plynů v roce 2020 podle sektoru [52]

protokol vstoupil v platnost v roce 2005, více než 7 let po svém vzniku, díky dlouhodobým problémům s jeho ratifikací, kterou muselo podepsat minimálně 55 států. Dokument má od počátku řadu kritiků. Jedni mu vyčítají, že je vzhledem k vynaloženým nákladům neefektivní, jiní jej zase kritizují jako málo ambiciózní. Svého cíle protokol nedosáhl. EU se daří Kjótský protokol plnit, ale podle programu OSN pro životní prostředí z roku 2012 se koncentrace skleníkových plynů od roku 2000 naopak zvýšila asi o 20 % [27].

V návaznosti na Kjótský protokol byla podepsána Pařížská klimatická dohoda [53], která vstoupila v platnost v listopadu 2016. Jejím zásadním cílem je udržení oteplování oproti předindustriálnímu období pod 2 °C. Od roku 2020 pak Kjótský protokol nahrazuje. Signatáři dohody se zavázali, že proto dále výrazně omezí ve svých zemích emise, především oxidu uhličitého. EU se zavázala ke společnému cíli snížit do roku 2030 emise skleníkových plynů o nejméně 40 % ve srovnání s rokem 1990. Evropský parlament si dokonce představuje ještě dosáhnout ambicióznější cíl a to redukovat emise do roku 2030 o 60 %. Ekologická představa EU pak spočívá v dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050. V roce 2017 od dohody odstoupili USA, což znamená, že bude zapotřebí ještě hodně úsilí a dlouhého politického vyjednávání, aby se efektivně splnily stanovené cíle. Další ránu pro ekologické plány by mohl být válečný konflikt na Ukrajině a budoucí ekologické směřování Ruské federace.

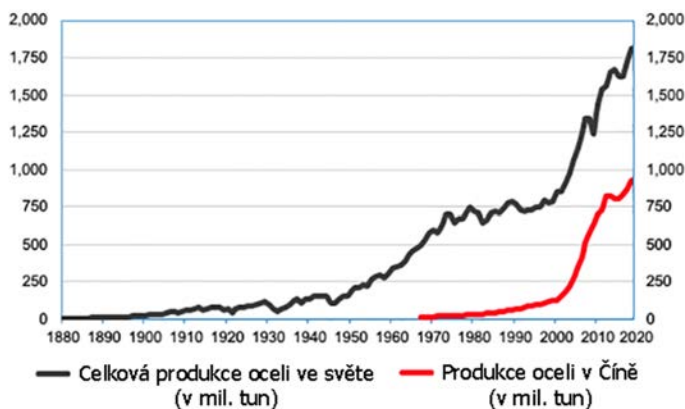
Navrhovaných způsobů na dosažení uhlíkové neutrality do roku 2050 je několik. Mezi ty hlavní patří masivní využívání obnovitelných zdrojů energie, zvýšení energetické účinnosti, obchodování s emisními povolenkami, mechanismus uhlíkového vyrovnání na hranicích (zabránění přesouvání neekologických výrobních procesů do zemí, které mají méně přísná pravidla pro emise skleníkových plynů), elektrifikace automobilové dopravy, konzumace laboratorně pěstěného masa a zalesňování kontinentů [53]. Důležitým ukazatelem je rozložení produkce emisí podle jednotlivých sektorů, obrázek 1.2. Z něj je vidět, že průmyslový sektor je jedním z největších znečišťovatelů životního prostředí. Metody Průmyslu 4.0 by pak synergicky měli přispět k takové optimalizaci výrobních procesů, která bude mít mimo ekonomických zisků i pozitivní vliv na životní prostředí [51].

1.3 Hutnický průmysl

Historie zpracování kovů započala již v době kamenné, kdy lidé nacházeli kov v přírodě, v jeho ryzí formě. Postupně se zdokonalovali v jeho opracování, až byli schopni zpracovat měď, nebo vyrobit bronz a další slitiny barevných kovů. Znamky první výroby železa se datují kolem 3 000 let před

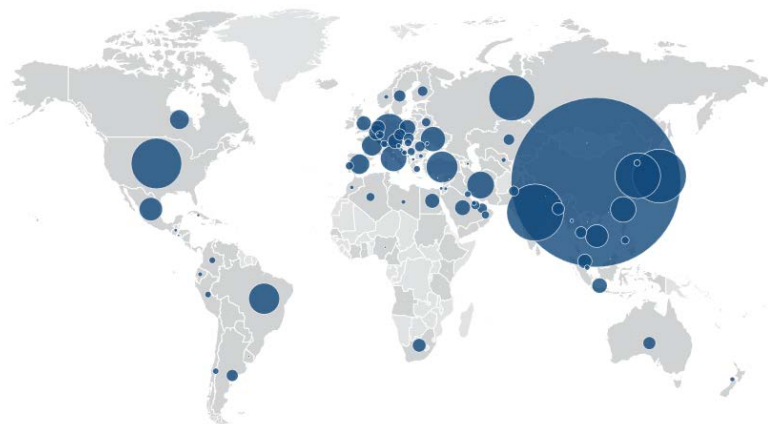
naším letopočtem. Kolem roku 1250 před naším letopočtem pak se výroba železa rozšířila masivněji. Hutnictví pak mělo přímý vliv na pokrok v různých odvětvích hospodářství [7]. Železo se přitom vyrábělo redukcí oxidických rud získaných především díky povrchové těžbě. Jeho výroba byla náročným procesem díky vysokému bodu tání železa (1535 °C) [6]. První vysoké pece, které umožňovaly zpracovávat železo v tekuté formě, jsou na našem území datovány v 16. století. V roce 1855 si Henry Bessemer nechal patentovat své metalurgické zařízení a s ním i proces výroby oceli jako slitiny železa s uhlíkem a dalšími kovovými a nekovovými prvky [4]. Výroba oceli dnes nepředstavuje pouze proces zkujňování, ale složitý pochod výroby železných slitin o předepsaném chemickém složení, případně předepsaných vlastností, kterých se dosahuje řízeným procesem tuhnutí a dalšího metalurgického zpracování. Na počátku 20. století se začala při výrobě oceli uplatňovat i elektrická energie v elektrických obloukových a v indukčních pecích. Hutnictví nadále procházelo dalšími modifikacemi, jako jsou nové vyzdívky konvertoru, oxidaci, proces legování, technologie plynulého odlévání nahrazující nevhodné lité ingotů do kokil a proces teplého a studeného válcování. Dnes existuje více než 2 000 různých druhů ocelí s přesně definovaným složením a mechanickými vlastnostmi, jako je pevnost, tvrdost, chemická odolnost, které jsou široce používány v průmyslu, stavebnictví a v dalších odvětvích [4].

Ocel dnes patří mezi základní materiály, ovlivňující každý aspekt lidského života. Spotřeba oceli na jednoho obyvatele je důležitým indexem společenského rozvoje [74]. Světová produkce oceli od roku 1900 do roku 2020 je zachycena v grafu 1.3. Z grafu je patrný neustálý rostoucí trend, způsobený stále větší poptávkou po této surovině. Na druhou stranu je ocelářský průmysl energeticky náročným procesem a jedním z největších výrobců skleníkových plynů, v roce 2020 produkoval 3 miliony tun CO₂ a tvořil přes 7 % celosvětové produkce CO₂ [58]. Je tedy zřejmé, že tyto dva ukazatele jdou proti sobě a je nutné hledat možnosti, jak výrobu této suroviny co nejvíce ekologizovat.



Obrázek 1.3: Světový vývoj produkce oceli [73]

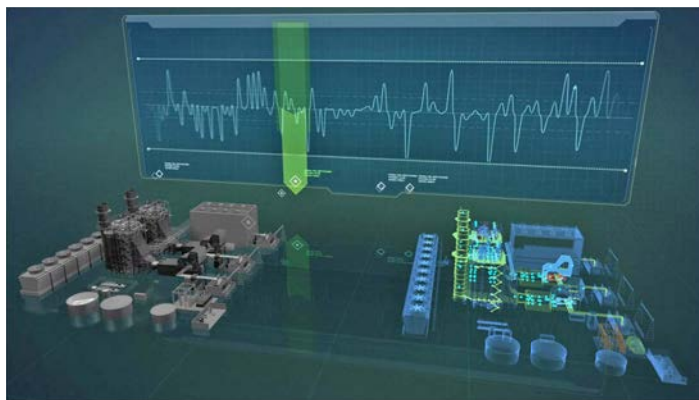
Výroba oceli je zejména orientovaná do zemí, jako je Čína (53,3 % v roce 2020) a Indie (obrázek 1.4) [73], kde zatím nejsou striktní emisní limity v porovnání se západními zeměmi. Přesto, že je Čína největším emitentem skleníkových plynů na světě (cca. 29,7%), předsevzala si za cíl dosáhnout uhlíkové neutrality do roku 2060. Ke splnění tohoto cíle však budou muset proběhnout velké transformace zejména v energetice a těžkém průmyslu, který je v Číně soustředěn. Jednou z transformací hutní výroby by mělo být zapojení metod Průmyslu 4.0, čímž by došlo jak ke snížení emisí skleníkových plynů, tak ke snížení výrobních nákladů, což je jediná možnost pro oceláře jak si udržet svoji konkurenceschopnost na trhu, zvláště v dnešní době, kdy dramaticky zdražují základní vstupní suroviny a tlačí tak cenu oceli radikálně nahoru (v roce 2021 o 20-30 %).



Obrázek 1.4: Koncentrace světové produkce oceli [73]

1.4 Digitální dvojče a jeho význam

Vývoj výpočetní techniky umožňuje tvorbu stále dokonalejších digitálních replik reálných výrobních zařízení tzv. digitálních dvojčat [39]. Taková virtuální replika pak funguje jako systém pro podporu lidského rozhodování a pomáhá např. odhalit různé výrobní chyby, nalézt úzká místa procesu, optimálně reagovat na nestandardní/poruchové výrobní situace, a to nejen při provozu, ale dokonce v předstihu, než se dané zařízení do provozu uvede. Digitální dvojče může rovněž sloužit k trénování operačního personálu, nebo být využito pro optimalizaci výrobního procesu ve smyslu zvýšení produktivity výroby, plánování údržby či zkrácení doby zprovoznění nových výrobních linek. Soubor těchto digitálních dvojčat pak můžeme nazvat virtuální továrnou [39].



Obrázek 1.5: Grafické znázornění digitálního a reálného dvojčete [39]

Digitální transformaci podstupují všechny obory, přičemž průmyslová výroba a logistika se v přijímání nových technologií zařazují na přední příčky, a to především z důvodu maximalizace produktivity, kvality a variability produktů a služeb, stejně jako přidané hodnoty, kterou podniky dokážou generovat. Mezi technologie, jež nabývají stále většího významu v éře kyberprůmyslu a inteligentní logistiky, se zařazuje i technologie digitálního dvojčete, který umožňuje neustále na dálku monitorovat stav skutečného objektu, jakož i simulovat různé situace s přesnými a reálnými daty.

Podle studie mezinárodní analytické společnosti Gartner [20] již 75 % podniků využívá inteligentní řešení a implementuje technologii digitálního dvojčete nebo to plánuje udělat v rámci jednoho roku. Digitální dvojče se tak dostává do základního inventáře průmyslu a podniků digitálního věku spolu s internetem věcí (IoT) [13], velkými daty (Big Data) [10] a strojovou inteligencí (Machine Intelligence) [50]. Přestože pojem digitálního dvojčete se dostal do širšího povědomí až v roce 2002, kdy ho Michael Grieves definoval v souvislosti s řízením životního cyklu výrobku, jeho koncept předcházela éra Průmyslu 4.0 [21], jeho kořeny sahají do sedmdesátých let, kdy NASA pracovala na projektu Apollo. Nicméně nasazení přesných virtuálních kopií, které by dokázaly zpracovávat informace v reálném čase a navíc proces optimalizovat, bránil výpočetní výkon. Dnes se nacházíme v situaci, kdy se dá do značné míry tvrdit, že zajistit potřebný výpočetní výkon již není problém a tudíž mohou vznikat propojené digitální uzly simulující celou výrobní továrnu (Smart Factory). Využití digitálního dvojčete se označuje za paradigmatický posun, neboť konvenční metody již nedokážou vyhovět náročným požadavkům projektů nové generace. A totéž se vztahuje i na výrobní a logistické procesy, tradiční technologie a metody, které jsou již nedostatečné pro zabezpečení udržitelného růstu a nemožou tak vyhovovat novým požadavkům, od optimalizace nákladů až po spotřebitelskou kustomizaci v masové výrobě.

V současnosti je pojem digitální dvojče chápán především jako virtuální reprezentace fyzických objektů, výrobních a přepravních zařízení, ale také procesů, systémů, pracovníků nebo celého prostředí. Digitální dvojče tak již není pouze virtuální model reálného protějšku, ale dynamický nositel dat a stavových informací získaných prostřednictvím množství senzorů a snímačů propojených internetem věcí [39]. Digitální dvojče v této podobě tedy slouží k monitorování fyzických objektů a procesů v reálném prostoru a čase, jelikož tato technologie umožňuje vytvářet velmi detailní digitální obraz se skutečnými daty (viz obrázek 1.5). V komplexních simulačních modelech dvojče zrychluje a ulehčuje rozhodovací procesy, usnadňuje přímou identifikaci možných následků a zvažovaných změn, jakož i klíčových vzorců chování v jednotlivých procesech. Tato forma implementace přináší hlubší poznatky chování jednotlivých složek v procesech, ale i schopnost odhalovat slabá místa provozu, která je nutné stabilizovat a optimalizovat, aby došlo k udržitelnému nárůstu výkonnosti procesů a k posílení robustnosti prostředí [61]. Nově vznikla i aktivní forma digitálního dvojčete, která disponuje řídicí funkcionalitou a dokáže provádět zadaný úkol bez přímé lidské obsluhy v podobě umělé inteligence [39].

Technologie digitálního dvojčete navíc má všestranný potenciál nejen pro dynamické a autonomní řízení výrobních podniků a inteligentní průmysl, ale její funkčnost dnes již proniká do oblastí zdravotní péče, projektování, maloobchodu, údržby a v neposlední řadě i do digitální transformace měst (Smart City) [2]. Ústřední postavení digitálního dvojčete vyplývá i z jeho organického provázání s ostatními technologiemi, jako jsou internet věcí a služeb, umělá inteligence, strojové učení nebo rozšířená analytika a zpracování velkých dat.

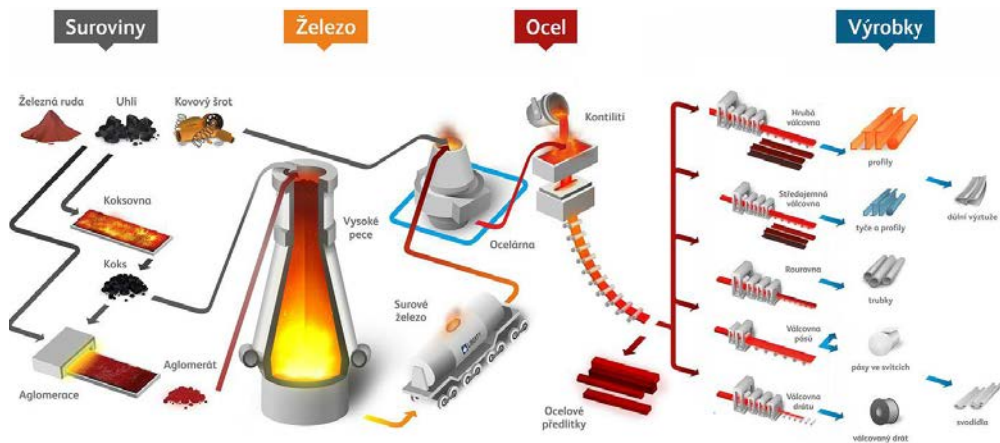
V kontextu předchozích kapitol lze konstatovat, že digitální dvojče je jedna z metod Průmyslu 4.0, která by měla přispět k transformaci a optimalizaci hutních procesů, tak aby tyto provozy byly ekonomičtější, ekologičtější a energeticky efektivnější. Toto je pak nosné téma habilitační práce, tedy vytvoření digitálního obrazu reálného hutního provozu, který je verifikován a nad kterým je vytvořen optimalizační modul na hledání parametrů pro zvýšení ekonomičnosti a ekologičnosti procesu. Práce je vystavena na příložených autorových článcích uvedených v kapitole 3 a seznamu literatury [9], [37], [41] - [45].

Kapitola 2

Digitalizace zařízení pro plynulé odlévání

2.1 Proces výroby oceli

Na začátku výroby oceli je surové železo, které se vyrábí ve vysoké peci z železné rudy za pomoci koksu, vápence a dalších přísad [4], [6]. Ocel se vyrábí zkujňováním surového železa s přísadou ocelového šrotu anebo pouze z ocelového šrotu v obloukových pecích. V první fázi se snižuje obsah uhlíku a odstraňují se nežádoucí prvky pomocí oxidace. Druhá fáze se nazývá rafinace, kdy se z oceli odstraňuje přebytečný kyslík pomocí feroslitin manganu a křemíku nebo pomocí hliníku. Nakonec se ocel odsiřuje. Tekutá ocel je pak v pánvích (s kapacitou 50 - 250 tun) převážena do zařízení na plynulé odlévání (ZPO) [6]. Zde se lije do tzv. mezipánve, s regulovanou výpustí. Z mezipánve je ocel přiváděna do vodou chlazené měděné formy tzv. krystalizátoru. Hlavní funkce mezipánve spočívá v udržení konstantní hladiny oceli v krystalizátoru a zajištění nepřerušovaného lití po dobu výměny pánve. Má rovněž zásadní vliv na kvalitu a čistotu oceli. Krystalizátor tvoří primární zónu chlazení ZPO, kde vzniká pevná skořepina schopna udržet tekuté jádro při vstupu do sekundární chladicí zóny. Mezi stěny krystalizátoru a tekutou ocel je přiváděn licí prášek [67], který zabraňuje oxidaci oceli a jejímu přichytávání na stěny krystalizátoru. Tomu rovněž zabraňuje jeho oscilace. Tvar krystalizátoru pak určuje tvar a velikost ocelového polotovaru. Sekundární zóna ZPO je tvořena soustavou chladících trysek a vodících válců. Vzhledem k požadavkům na vysokou produktivitu výroby, která je přímo úměrná licí rychlosti, musí sekundární chlazení dokončit tuhnutí tekutého jádra před místem řezání. Ocel dále pokračuje do terciální chladicí zóny, kde probíhá její chlazení formou přirozené konvekce a radiace. Na konci terciální zóny je pálící zařízení, které dělí proud oceli podle typu ZPO a podle odlévaného profilu obdélníkového/čtvercové/válcového na jednotlivé bramy/sochory/válce [4], [6]. Ocelový polotovar za pálícím strojem nazýváme společným názvem předlitek. Podle druhu těchto ocelových produktů může následovat teplá válcovna, studená válcovna, proces žihání, proces kalení, proces tažení a povrchové úpravy jako je např. zinkování. Schéma výroby oceli je na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Schéma výroby oceli [65]

2.2 Kvalita oceli a faktory, které ji ovlivňují

Z pohledu kvality oceli je na ZPO rozhodující ta jeho část, ve které dochází ke změně skupenství kapalného (taveniny) na pevné [67]. Předlitek jak je nazýván ocelový polotovár určený k dalšímu zpracování prochází při průchodu ZPO velkými teplotními a mechanickými změnami. Nadměrné chlazení v zóně sekundárního chlazení může snížit povrchové teploty a umožnit zvýšení lící rychlosti, avšak může rovněž způsobit velké teplotní napětí na povrchu předlitku a tím inicializovat vznik trhlin [4]. Odvod tepla stěnami krystalizátoru, jeho oscilace a použití různých licích prášků má také významný vliv na kvalitu předlitku [6]. ZPO je rovněž z pohledu řízení nejsložitějším zařízením ve výrobním řetězci produkce oceli, přičemž podíl plynule lité oceli ve světě přesahuje 97 % [57]. Z pohledu kvality ocelového produktu vychází nejlépe gravitační (vertikální) lití, nejčastěji se však kvůli rozměrům ZPO používá radiální ZPO [6], ve kterém se předlitek v určité části ZPO zakřivuje a následně zase rovná, což může způsobovat z pohledu mechanického napětí vznik dalších trhlin a prasklin.

V procesu výroby oceli jsou z pohledu ekonomických i ekologických zásadní dva ukazatele a to kvalita finálního výrobku a produktivita výroby. Tyto dva ukazatele však jdou do jisté míry proti sobě. Z pohledu produktivity výroby oceli je právě lící rychlost ZPO hlavním určujícím faktorem, který udává rychlost ve všech předchozích i navazujících operacích [14]. Dá se říci, že z pohledu průchodu oceli celým výrobním řetězcem je ZPO úzkým místem. Z ekologického hlediska zvýšení produktivity zpracování oceli může vést ke snížení emisí skleníkových plynů. Z pohledu procesu tuhnutí oceli však má lící rychlost zásadní vliv (tedy ovlivňuje výslednou kvalitu oceli) a její navyšování bez dalších informací o kvalitě a rovněž bezpečnosti procesu není možné.

Z pohledu kvality výsledného ocelového produktu-předlitku je právě optimální nastavení ZPO zcela zásadní. Kvalita je zákazníkovi posuzována dle vlastností v pevném stavu, a to vlastností mechanických (pevnost, tažnost, mez kluzu, atd.), fyzikálních (hustota, pružnost, součinitel tepelné vodivosti, atd.), chemických (korozivzdornost, odolnost v sirovodíkovém prostředí, atd.) či technologických (svařitelnost, prokalitelnost, atd.). Dosažení požadované kvality je však pro výrobce složité, protože musí tyto vlastnosti predikovat na základě měřených technologických veličin a materiálu v litém stavu [67]. Kvalitu ocelového polotovaru určuje především charakter její makrostruktury a výskyt jejích vad. Požadovaná čistota materiálu potom znamená absenci nebo minimalizaci nekovových vměstků v materiálu [15]. Dalším parametrem ovlivňujícím koncovou kvalitu předlitku je chemické složení oceli. To však lze ještě ovlivnit přidáváním příměsí v mezipánvi před zalitím krystalizátoru [6], při průchodu proudem strojem již nikoli. Při lití oceli na ZPO vystupuje celá řada technologií, které finální kvalitu ovlivňují. Mezi tyto technologie patří:

- zpracování oceli v mezipánvi (mezipánvová metalurgie),
- elektromagnetické míchání oceli (především u sochorů),
- elektromagnetická brzda,
- protiprůvalové systémy,
- technologie oscilací krystalizátoru,
- automatizace řízení,
- aplikace teplotních modelů,
- systémy predikce kvality předlitku.

V dnešní době jsou tyto technologie řízeny počítačově a jsou doplněny algoritmy pro podporu lidského rozhodování [57]. Např. protiprůvalové systémy mohou být opatřeny neuronovými algoritmy, které mají za úkol rozpoznat hrozbu průvalu s vysokou pravděpodobností.

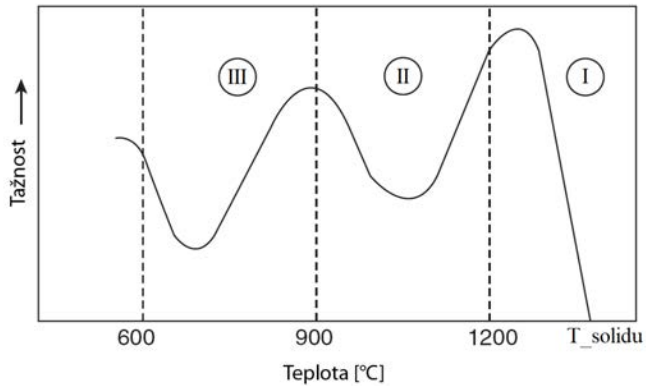
Ukazatelem nedodržení kvality oceli je tvorba trhlin, jejich tvar a jejich počet [19]. Tvorba trhlin souvisí s tzv. tažností, která charakterizuje plastické vlastnosti materiálu a představuje trvalou relativní deformaci [68]. Lze jí definovat jako schopnost oceli po překročení meze kluzu se prodlužovat, aniž by docházelo k výraznému nárůstu napětí [62]. Tažnost oceli za vyšších teplot je obvykle měřena tahovou zkouškou provedenou na ohříváném vzorku, mnohdy vyrobeném přímo z plynule odlitého předlitku, která se provádí v inertní atmosféře až do lomu. Obecně jsou pozorovány tři identifikovatelné oblasti teplot (obrázek 2.2), ve kterých má ocel sníženou tažnost a je proto náchylná k tvorbě trhlin:

- První se nachází pod teplotou solidu v intervalu 40 - 70 °C. S výjimkou příčných povrchových trhlin se téměř všechny trhliny v předlitcích tvoří v této vysokoteplotní zóně nízké tažnosti. Poznatek, že se při plynulém odlévání oceli téměř všechny podélné trhliny tvoří ve známém teplotním intervalu, je velmi důležitý. Ze znalosti rozložení teplot v předlitku plyne, že všechny povrchové podélné trhliny se tvoří především v krystalizátoru, kdežto podpovrchové trhliny se tvoří pod krystalizátorem, kde je tloušťka ztuhlé skořepiny silnější [19].
- Druhá zóna nízké tažnosti se objevuje v rozsahu teplot 800 - 1200 °C. Tato ztráta tažnosti významně závisí na poměrném obsahu manganu a síry a na teplotní historii oceli. Nepotvrdilo se však, že by tato nízká tažnost, která je výsledkem precipitace sulfidů na hranicích zrn, významně přispívala k tvorbě trhlin při plynulém odlévání oceli [15].
- Třetí zóna nízké tažnosti se nalézá v teplotním rozsahu 700 - 900 °C a je důležitým faktorem při tvorbě příčných trhlin. Tažnost v tomto teplotním rozsahu je snižována rostoucím obsahem hliníku, dusíku, niobu a vanadu. Ztráta tažnosti je v tomto případě spojena s vylučováním nitridů a karbonitridů na hranicích zrn [15].

Ocel, u níž by bylo možno očekávat, že bude za vysokých teplot tažná, je ve skutečnosti značně náchylná k tvorbě trhlin. Má-li být zabráněno tvorbě trhlin, je potřeba pečlivě sledovat teplotní průběhy během lití oceli a nastavit podle toho parametry ZPO [25]. Přestože je plynulé lití je proces dynamický, právě teplotní stabilita procesu je pro výslednou kvalitu oceli zásadní. Toto skutečnost je autorem zpracována v kapitole 3.4 [43], kde je statisticky sledován vliv teplotních průběhů na povrchu předlitku a vznik souvisejících vad. Pro jejich minimalizaci pak digitální dvojče spolu s optimalizačním algoritmem navrhuje nové nastavení intenzity chlazení, tak aby byla i pro rozdílné rychlosti lití zachována požadovaná teplotní stabilita.

2.3 Digitální dvojče ZPO

Jak vyplývá z výše uvedeného textu, je pro dosažení kvalitního ocelového produktu a zároveň dosažení co nejvyšší produktivity výroby nutné mít optimálně nastaveny všechny parametry lití na



Obrázek 2.2: Oblasti snížené tažnosti oceli [68]

ZPO. Hledat tyto parametry na základě měření povrchových teplot a materiálových analýz odlitých polotovarů není při množství odlévaných ocelových značek reálné. To je důvod, proč se celá řada autorů snaží vytvořit co nejvěrnější digitální kopii reálného licího provozu, na které je možné zkoušet různé licí scénáře a vypracovávat různé parametrické studie [1], [5], [23], [24], [28], [40], [55], [71]. Rovněž je od těchto virtuálních dvojčat požadováno, aby byly schopny v reálném čase zaznamenávat parametry lití, zejména informace o teplotním poli [69]. Aby však bylo možné mít digitální dvojče ZPO, které je schopné pracovat v reálném čase, resp. rychleji, je nutné si uvědomit, že proces plynulého lití je ovlivněn celou řadou níže uvedených parametrů:

- kompletní turbulentní přechodový tok v krystalizátoru,
- termodynamické reakce mezi licím práškem a tuhoucím předlitkem,
- přenos tepla mezi tekutým a pevným práškem na povrchu krystalizátoru,
- dynamický pohyb tekuté oceli uvnitř krystalizátoru na rozhraní mushy zóny a tekuté fáze, včetně vlivu gravitace, oscilací a rychlosti odlévání,
- přenos tepla v přehřáté tavenině s ohledem na turbulentní proudění,
- přechodové (směsné) složení oceli při změně jakosti oceli,
- tepelná a mechanická interakce v oblasti hladiny oceli mezi tuhoucím, pevným licím práškem a tekutou ocelí,
- přenos tepla z povrchu ztuhlé skořepiny do prostoru mezi skořepinou a pracovní plochou krystalizátoru (včetně vrstev licího prášku a vzduchové mezery),
- přenos licího prášku během jeho svislého pohybu mezerou mezi skořepinou a krystalizátorem,
- kontakt ztuhlé vrstvy s formovacími a podpůrnými válci,
- výskyt krystalů uvnitř taveniny,
- proces mikrosegregace a makrosegregace,
- výskyt smršťování v důsledku teplotního smrštění oceli a inicializace vnitřního napětí,
- výskyt napětí a deformace v ztuhlé skořepině v důsledku vnějších vlivů, jako je tření uvnitř krystalizátoru, vyboulení mezi vodícími válci, válcování, teplotní napětí a deformace,
- výskyt trhlin v důsledku vnitřního napětí,

- tok oceli v důsledku elektromagnetického míchání a vliv míchání na teplotní pole a primární strukturu,
- výskyt napětí a napětí v důsledku uvolnění (odlehčení vnější síly),
- tepelné záření,
- vodní a vodovzdušné chlazení.

S ohledem na složitost procesu lití včetně výše uvedených faktorů není možné, ani při dnešních výpočetních výkonech, vyvinout matematický model, který by zahrnoval všechny vlivy a byl schopen výpočtu v reálném čase. Jednotlivé faktory lze seskupit podle tří hlavních vlivů: přenosu tepla a hmoty, mechanických jevů a strukturálních jevů. Primární a rozhodující je vliv přenosu tepla a hmoty, protože je to právě teplotní pole, které vede k mechanickým a strukturálním změnám [4]. Předkládané digitální dvojčce představuje komplexní matematicko-numerický model ZPO, který je schopen výpočtu přesahující reálný čas, je dlouhodobě validovaný na několika reálných provozech, je opatřen uživatelským rozhraním a jeho součástí je optimalizační algoritmus pro nalezení optimálních licích parametrů, viz kapitola 3.2 [42].

Matematicky lze model přenosu tepla se změnou fáze a přenosu hmoty ve směru lití popsat Fourierovou-Kirghoffovou rovnicí [4], [32]

$$\frac{\partial (h\rho(T))}{\partial \tau} + v_{cast} \frac{\partial (h\rho(T))}{\partial z} = \nabla \cdot [\lambda_{eff}(T)\nabla T], \quad (2.1)$$

kde $\nabla \equiv \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ je nabla operátor, h [J/kg] je měrná entalpie, ρ [kg/m³] je hustota, τ [s] je čas, v_{cast} [m/s] je licí rychlost, z [m] je souřadnice ve směru lití, λ_{eff} [W/mK] je efektivní tepelná vodivost zahrnující složku konvekce a T [°C (K)] je teplota. Výsledkem řešení rovnice je teplota jako funkce času a polohy, tedy $T(x, y, z, \tau)$. Vztah mezi entalpií a teplotou je potom vyjádřen vztahem [49]

$$h = \int_0^T \left(c(\zeta) - L \frac{\partial f_s}{\partial \zeta} \right) d\zeta, \quad (2.2)$$

kde L [J/kg] je latentní teplo skupenské nebo strukturální přeměny a f_s [0-1] je tzv. podíl tuhé fáze, kde pro $f_s = 0$ je element ve stavu tekutém (kapalném), pro $f_s = 1$ je ve stavu tuhém a při $0 < f_s < 1$ se element nachází v tzv. mushy zóně (směs tuhé a tekuté fáze).

Modelování konvekce tekuté taveniny je komplexní úlohou, které je často řešeno pomocí CFD metod [67]. S tímto přístupem by však nebyl možný výpočet v reálném čase a proto se složka konvekce taveniny zahrnuje v hodnotě teplotní vodivosti. Existuje několik postupů jak určit hodnotu efektivní vodivosti. Např. podle vzdálenosti od hladiny oceli v krystalizátoru lze psát podle [79]

$$\lambda_{eff} = \begin{cases} \lambda & \text{pro } T \leq T_S \\ 4\lambda + \frac{3\lambda(T-T_L)}{T_{casting}-T_L} & \text{pro } T \geq T_L \wedge 0 \leq z \leq 1 \text{ m} \\ \lambda + \frac{3\lambda(T-T_S)}{T_L-T_S} & \text{pro } T_L \geq T \geq T_S \wedge 0 \leq z \leq 1 \text{ m} \\ \lambda + \frac{\lambda(T-T_L)}{T_{casting}-T_L} & \text{pro } T \geq T_L \wedge 1 \leq z \leq 3 \text{ m} \\ \lambda & \text{pro } z \geq 3 \text{ m.} \end{cases} \quad (2.3)$$

Vždy je potřeba podle geometrie ZPO volit tyto koeficienty (zejména vzdálenosti od hladiny krystalizátoru) a nalézt je v rámci validace modelu.

Řešení rovnic (2.1) - (2.3) je závislé na fyzikálních podmínkách na okrajích média a na podmínkách, při kterých se médium nachází v počátečním čase výpočtu. Počáteční podmínka se dá charakterizovat vztahem [32]

$$T(x, y, z, \tau = 0) = T_p(x, y, z), \quad (2.4)$$

který popisuje rozložení teploty napříč výpočetní doménou. V případě simulace stacionárního stavu lze často zadat konstantní teplotu v celé doméně na hodnotě která je rovna licí teplotě $T_p(x, y, z) =$

$T_{casting}$. V případě simulace dynamických změn je nutné zadávat počáteční podmínku z již předem vypočteného teplotního stavu.

Okrajové podmínky pro výpočet teplotního pole předlitku jsou popsány rovnicemi podle jednotlivých chladících zón [43]

$$\begin{aligned}
T(x, y, z) |_{z=0} &= T_{casting} && \text{hladina oceli (na začátku ZPO)} \\
-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= 0 && \text{rovina symetrie a v místě konce ZPO} \\
-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= \dot{q}_{mold} = \frac{\dot{m}_w c_w (T_{in} - T_{out})}{S_{mold}} && \text{v krystalizátoru} \\
-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= \dot{q}_{roll} = \frac{\pi (l_{roll}/2) d_{roll}}{S_{roll}} htc_{roll} (T_{roll} - T_{amb}) + \sigma \varepsilon (T_{roll}^4 - T_{amb}^4) && \text{pod válcem} \\
-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= htc (T - T_w) + \sigma \varepsilon (T^4 - T_w^4) && \text{v místě ostříku chladící tryskou} \\
-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} &= 0,84 (T - T_{amb})^{4/3} + \sigma \varepsilon (T^4 - T_w^4) && \text{v terciární zóně}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

kde \dot{q}_{mold} [W/m²] a \dot{q}_{roll} [W/m²] je měrný tepelný tok do krystalizátoru resp. do vodícího válce, S_{mold} [m²] je plocha krystalizátoru, S_{roll} [m²] je plocha válce, l_{roll} [m] a d_{roll} [m] je délka a průměr válce, \dot{m}_w [kg/s] a c_w [W/kgK] je hmotnostní tok chladící vody v krystalizátoru a měrná tepelná kapacita chladící vody, htc [W/m²K] je součinitel přestupu tepla pod chladící tryskou, htc_{roll} [W/m²K] je součinitel přestupu tepla z vodícího válce do okolí, σ [W/m²K⁴] je Stefanova-Boltzmannova konstanta, ε [-] je emisivita povrchu a teploty T_{in} , T_{out} , T_{roll} , T_{amb} , T_w [°C (K)] jsou teploty vstupní a výstupní vody do krystalizátoru, teplota na povrchu válce, teplota okolí a teplota chladící vody vycházející z chladící trysky v sekundární chladící zóně, viz kapitola 3.2 [42].

Rovnice (2.1) - (2.5) nejsou analyticky řešitelné, proto je třeba použít numerického řešení [32]. Existuje několik numerických schémat, které jsou ze své podstaty buď explicitní nebo implicitní, či kombinace obou. Protože jde o problém nelineární (více o nelinearitě systému v kapitole 2.4), není možné použít prosté implicitní numerické schéma, které by nebylo doplněno o vnitřní iterace. Využívá se tak semiimplicitních numerických schémat. Autorova literatura uvedená v kapitole 3.3 [41] se věnuje porovnání několika numerických schémat, pro řešení úloh s fázovou změnou z hlediska robustnosti, přesnosti a paralelizovatelnosti. Z výsledků je zřejmé, že dnešní masivní paralelizovatelnost, tedy možnost výpočtů na grafických kartách GPU, jednoznačně upřednostňuje explicitní numerická schémata, která jsou pro tento druh paralelizace vhodná. Explicitní diskretizační rovnice (2.1) dostaneme [12], [47]

$$h_{i,j,k}^{n+1} \rho_{i,j,k}^{n+1} = h_{i,j,k}^n \rho_{i,j,k}^n + \Delta \tau \left[\dot{Q}x + \dot{Q}y + \dot{Q}z \right] - \Delta \tau v_{cast} \frac{h_{i,j,k+1}^n \rho_{i,j,k+1}^n - h_{i,j,k}^n \rho_{i,j,k}^n}{\Delta z_{k-1}}, \tag{2.6}$$

kde $\dot{Q}x$, $\dot{Q}y$, $\dot{Q}z$ jsou tepelné toky, které lze rozepsat

$$\dot{Q}\psi = 2 \frac{\left(\frac{0,5}{\lambda_{\xi+1}^n} + \frac{0,5}{\lambda_{\xi}^n} \right)^{-1} \frac{T_{\xi+1}^n - T_{\xi}^n}{\Delta \psi_{\xi}} - \left(\frac{0,5}{\lambda_{\xi-1}^n} + \frac{0,5}{\lambda_{\xi}^n} \right)^{-1} \frac{T_{\xi}^n - T_{\xi-1}^n}{\Delta \psi_{\xi-1}}}{\Delta \psi_{\xi} + \Delta \psi_{\xi-1}}, \quad \psi \in \{x, y, z\}, \tag{2.7}$$

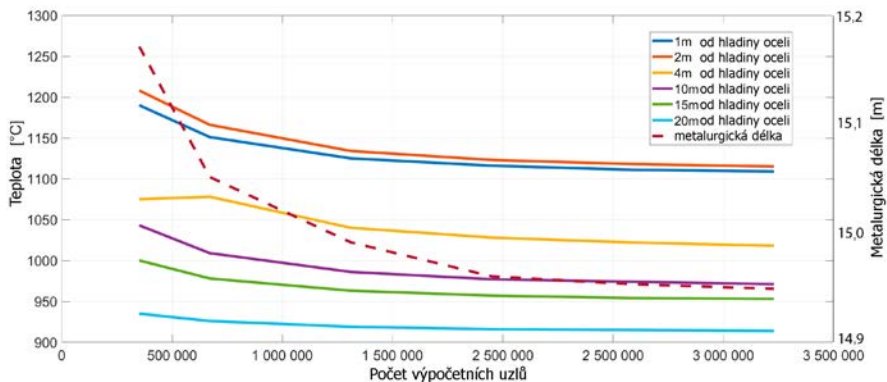
$$\xi \in \{i, j, k\}.$$

Index n značí aktuální časový krok, index $n + 1$ krok následující. Délka časového kroku je potom $\Delta \tau$. V kartézských souřadnicích x, y, z indexy i, j, k označují obecný uzel výpočetní sítě.

Podmínka stability omezující délku časového kroku v závislosti na délce kroku prostorového je dána vztahem [12], [47]

$$\Delta \tau \leq \frac{1}{\left(\frac{2\lambda(T)}{\rho(T)c(T)} \right) + \left(\sum \psi \frac{1}{\psi^2} \right) + \frac{v_{cast}}{\Delta z}}, \quad \psi \in \{x, y, z\}. \tag{2.8}$$

Z důvodu rychlosti a přesnosti výpočtu není rozložení výpočetní sítě ekvidistantní ve všech směrech. Lokální zjemnění je nastaveno na povrchu předlitku, kde dochází k velkým teplotním gradientům. Ve směru lití je síť také zjemněna zejména v oblastech, kde dochází ke kontaktu povrchu s chladicí tryskou, viz kapitola 3.2 [42]. Test nezávislosti sítě pro výpočet teplot na brámovém ZPO ukazuje, že numerický model by měl mít nejméně 2 500 000 výpočetních uzlů, jak znázorňuje obrázek 2.3. Lze na něm vidět, jak se mění povrchové teploty se změnou sítě a jak se mění hodnota metalurgické délky (tj. vzdálenosti místa posledního ztuhnutí taveniny v předlitku od hladiny taveniny v krystalizátoru). Používání jednoduchých modelů s hrubou výpočetní sítí by vedlo k velice nepřesným výsledkům.



Obrázek 2.3: Stabilita numerické sítě [42]

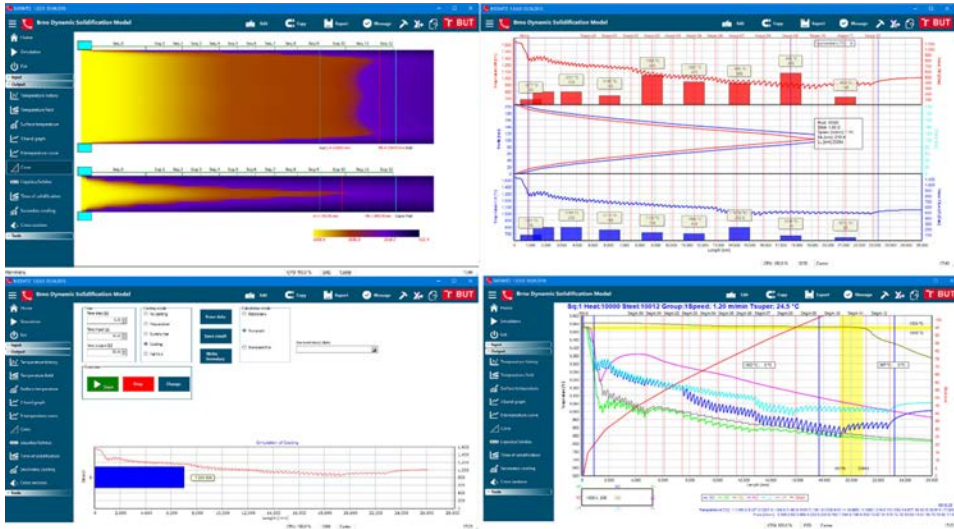
Výpočetní jádro předkládaného digitálního dvojčete umožňuje výpočty jak na jednom tak na více výpočetních jádrech. Cyklus přes prostorovou doménu (rovnice (2.6)) je rozdělen na jednotlivé jádra a po výpočtu opět složen do výsledné matice. Hlavní výhodou je možnost výpočtu jak na CPU tak na GPU, což dokládá autorova publikace v kapitole 3.4 [43]. S využitím GPU je pak možný výpočet několika modelů paralelně i v čase kratším než je reálný čas. To pak umožňuje využít výpočty predikce budoucích stavů a pomocí optimálního řízení nalézt nejlepší lící scénář.

Digitálním dvojčetem ZPO je tedy pokročilý 3D nestacionární numerický model tuhnutí, predikující rozložení teplotního pole podél předlitku a pozici tekutého jádra. Ukázka uživatelského rozhraní je na obrázku 2.4. Uživatelské prostředí je tvořeno tak, aby jej bylo možné ovládat z tabletu a mobilního zařízení. Toto prostředí komunikuje přes internet s výpočetní stanicí, na které probíhá numerický výpočet a sběr dat. Uživatel tak vidí aktuální informace o tavně, chemickém složení odlévané oceli, průběhu teplot, intenzitě chlazení, lící rychlosti a dalších parametrech ZPO, zcela podle konceptu Průmyslu 4.0.

2.4 Nelinearity digitálního dvojčete ZPO

V matematickém modelu, což je základ digitálního dvojčete ZPO, popsaného rovnicemi (2.1)-(2.5) se objevují tři druhy nelinearity:

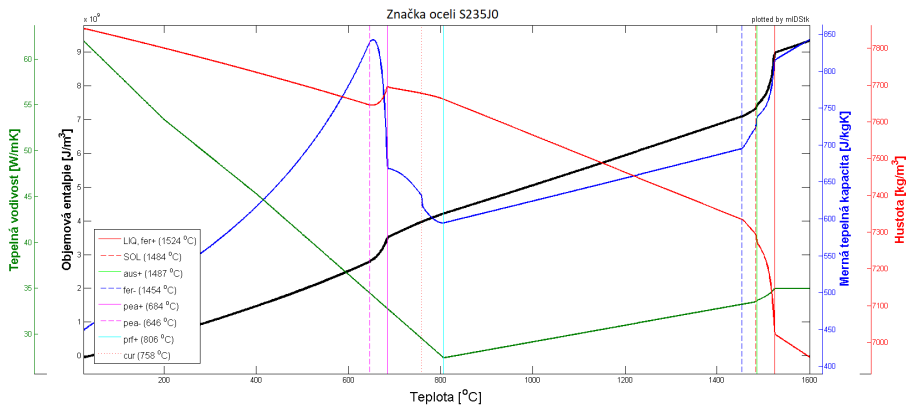
- nelinearita ve vztahu mezi teplotou a entalpií při uvolňování latentního tepla fázové nebo strukturální změny,
- nelinearity termofyzikálních vlastností oceli (teplotní závislost hustoty, měrné tepelné kapacity a tepelné vodivosti),
- nelinearita okrajových podmínek (zejména závislost součinitele přestupu tepla pod chladicí tryskou na povrchové teplotě).



Obrázek 2.4: Uživatelské rozhraní digitálního dvojčete ZPO

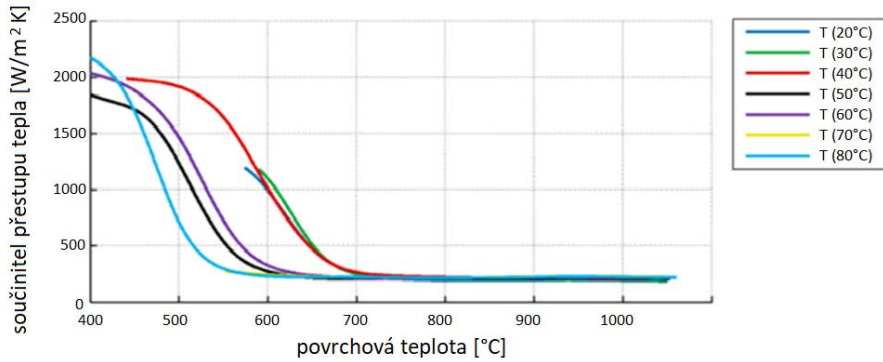
První dva typy nelinearit, tedy teplotní závislost termofyzikálních vlastností a objemové entalpie je demonstrována na obrázku 2.5 pro vybranou typicky odlévanou značku oceli S235J0. Pro další vybrané druhy ocelí jsou tyto nelineární závislosti graficky uvedeny v autorových článkách v kapitole 3. Výpočet termofyzikálních vlastností byl proveden solidifikačním softwarem IDS [46]. Zde je zřejmá silná nelinearita na teplotě, přes kterou proces chlazení probíhá. Při modelování procesu lití oceli je důležitý teplotní interval mezi 600 - 1550 °C.

Nelinearita v okrajové podmínce může být vyjádřena jako závislost součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě. Pro různé teploty chladicí vody je potom ukázána na obrázku 2.6 a detailněji popsána v autorově článku, kapitola 3.7 [45]. I zde je zřejmá nelinearita, která je připisována tzv. Leidefrostovému jevu [60].



Obrázek 2.5: Ukázka teplotní závislosti termofyzikálních vlastností oceli

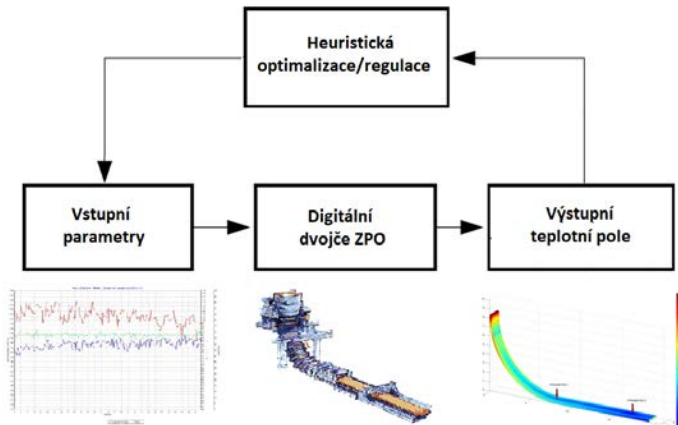
Z pohledu optimalizace pro nelineární systémy, na rozdíl od systémů lineárních, neexistuje metoda, která je schopna zajistit nalezení globálního optima [3]. Navíc řešení nelineárního optimalizačního problému je obecně podle definice výpočetní náročnosti NP-problém [3]. Je-li to v praxi možné,



Obrázek 2.6: Ukázka závislosti součinitele přestupu tepla na povrchové teplotě a teplotě chladicí vody [26]

používají se metody na zlinearizování dané úlohy. Vzhledem k silným nelinearitám, které jsou pro proces ZPO typické, však nejsme schopni provést linearizaci systému bez značné výsledné chyby. Optimalizační výpočetní čas tak není úměrný velikosti systému, v tomto případě velikosti diskretizační sítě, která by v případě Bramového lití měla mít podle obrázku 2.3 alespoň $N = 2,5$ milionů výpočetních uzlů. Z pohledu optimalizace je pak počet rovnic úměrný počtu uzlů N ještě vynásobený počtem časových kroků potřebných na dosažení stacionárního stavu. Počet časových kroků závisí na podmínce stability (2.8) a na volbě podmínky počáteční. Pro výpočty prezentované na obrázku 2.3 bylo k dosažení výsledku v průměru provedeno cca. $\tau = 2000$ časových kroků. Optimalizační problém by potom musel řešit $N \cdot \tau = 3$ miliardy nelineárních rovnic. Přímá optimalizace pomocí metod matematického programování možná je, ale její časová náročnost by překračovala její smysluplné použití [3].

Jedinou možností je potom oddělení numerického modelu od modelu optimalizačního. Numerický model potom bude pro model optimalizační vystupovat jako tzv. černá skříňka (black-box) [76], viz obrázek 2.7. Detailní popis tohoto přístupu je pak zpracován v autorově publikaci 3.2 [42].



Obrázek 2.7: Schéma regulace digitálního dvojčete pomocí optimalizace [42]

Tento koncept řešení lze nalézt v několika literárních zdrojích [29], [30], [34], [35], [38], [64], [66], [72], [75]. V nich je však často využito pouze zjednodušených 1D a 2D numerických modelů,

jednoduchých okrajových podmínek, zanedbání linearit, a tedy není zcela jasná možnost využití na reálném provozu, kde je nutné mít co nejlepší výsledek. Současně jsou tyto práce navzájem neporovnatelné a je nutné testovat různé optimalizační přístupy na jednom numerickém modelu, nejlépe komplexním a validovaném 3D modelu. Toto porovnání popisuje autorova publikace v kapitole 3.5 [9], kde je demonstrována aplikace několika druhů optimalizačních přístupů na jednom konkrétním modelu ZPO. Z výsledků je jasné vidět, že některé optimalizační algoritmy dosahují v této problematice výrazně lepších výsledků, než ostatní.

2.5 Validace digitálního dvojčete ZPO

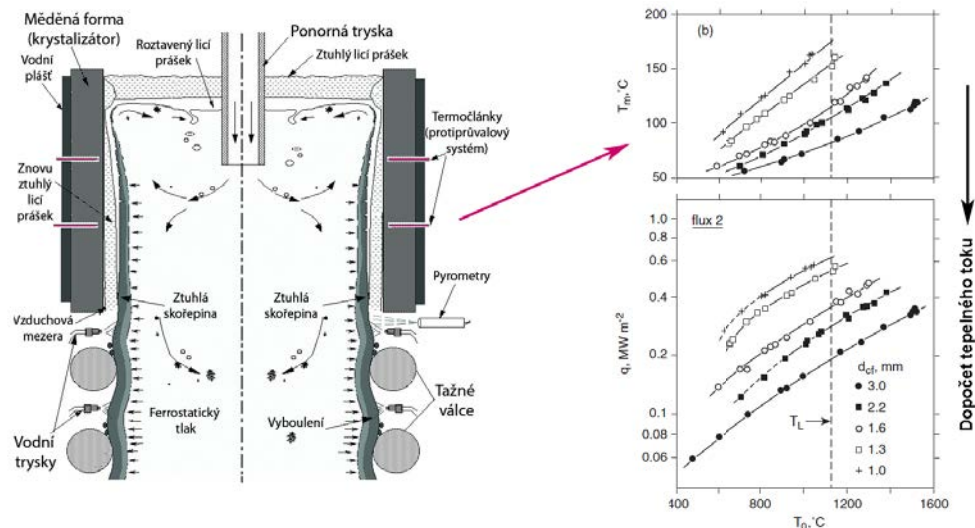
Pro nasazení digitálního dvojčete ZPO v provozu a pro jeho následnou optimalizaci je nezbytné ověřit jeho výsledky s reálným provozem [4]. Proces plynulého lití je natolik komplexním problémem, že lze numerické modely ověřovat laboratorně, pouze v omezeném rozsahu. Laboratorně lze ověřit např. termofyzikální vlastnosti pro konkrétní ocel v závislosti na teplotě [63]. Některé typy okrajových podmínek lze rovněž ověřit laboratorně, např. součinitel přestupu tepla pod chladicí tryskou [59]. Obecně je však nezbytné digitální dvojče ZPO validovat přímo na reálném provozu. To má však několik omezení. Vždy je možné pouze měřit hodnoty v místech, ve kterých to ZPO svou konstrukcí vůbec umožňuje. Navíc v případě tvrdého chlazení dochází k velké přeměně chladicí vody v páru a v některých místech ZPO může pyrometrické měření vykazovat zcela zkreslené výsledky. Kvůli vysokým teplotám je nutné volit speciální měřicí techniku. Ze stejného důvodu se kontinuálně měří přímo na trati relativně malé množství veličin.

Pro validaci solidifikačního modelu se nejčastěji využívají na ZPO tři druhy měření, které nejsou invazivní [6]:

- měření pomocí termočlánků umístěných ve stěně krystalizátoru,
- termovizní a pyrometrické měření povrchu předlitku,
- radioskopická metoda.

Naopak mezi metody invazivní pak patří např. řízený průval, při kterém se hledá poloha metalurgické délky [6]. Pro výrobce oceli je však použití experimentálních invazivních metod obecně nepřijatelné. Spíše se pak používají informace a data z havarijních situací, kdy např. k průvalu již došlo.

Měření pomocí termočlánků umístěných ve stěně krystalizátoru má tu výhodu, že toto měření probíhá kontinuálně, ale pouze v primární zóně chlazení. Hlavním účelem používání těchto termočlánků je tzv. protiprůvalový systém, který zabraňuje možným havarijním scénářům při provozu. Naměřené teploty mají pouze informativní charakter, protože mezi teplotou měřenou termočlánkem a teplotou na povrchu předlitku je několik tepelných odporů v podobě licích prášků, vzduchové mezery a měděné stěny krystalizátoru [4]. Na druhou stranu, síť termočlánků zachycuje přibližné rozložení povrchových teplot, ze kterého lze optimalizačně dopočítat tepelný tok, ten dosadit do simulace a porovnat vypočítané teploty s měřením, obrázek 2.8. Ukázka měřených dat z několika termočlánků instalovaných ve stěně krystalizátoru je na obrázku 2.9-vlevo. Zde je vidět, že je nutné před výpočtem tepelného toku data nejdříve filtrovat, např. filtry ARMA [48].

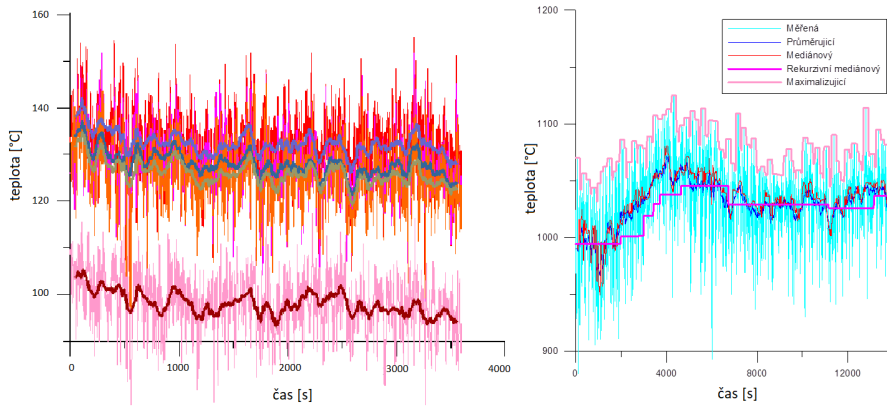


Obrázek 2.8: Schéma krystalizátoru se zapojením termočlánků, měření teplot a vypočítaný tepelný tok [4]

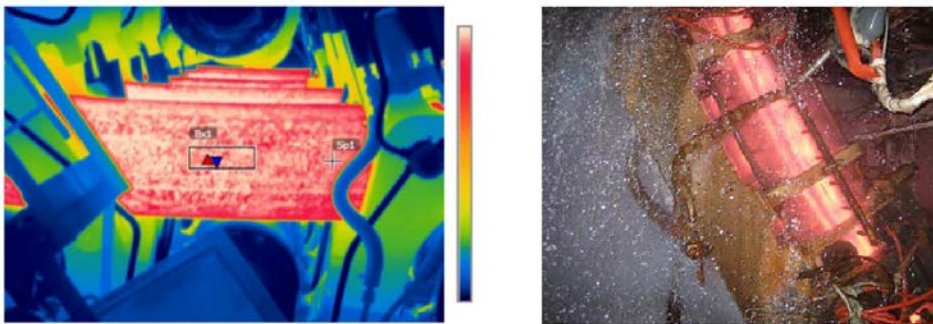
Termovizní a pyrometrické měření povrchových teplot je nejčastěji používaná metoda na ověření digitálního dvojčete ZPO, obrázek 2.10. Reálné lici provozy mají poměrně často permanentně instalovány na několika místech lici trati pyrometry nebo teplotní skenery, které dávají dlouhodobou informaci o povrchových teplotách [69]. Lze tak dlouhodobě sledovat teplotní chování ocelí s rozdílným chemickým složením, popř. vyhodnocovat opotřebení liciho stroje. Toto dlouhodobé měření povrchových teplot pak lze s výhodou využít na validaci a zpřesňování parametrů digitálního dvojčete ZPO, což je i případ předkládaného digitálního dvojčete. Autorova publikace 3.2 [42] obsahuje porovnání počítaných povrchových teplotních průběhů spolu s naměřenými pyrometrickými daty, kde dochází k dobré shodě mezi simulací a reálným provozem. Je však nutné zmínit, že se zde ověřuje a porovnává pouze povrchová teplota. O teplotním rozložení uvnitř předlitku získaného pomocí simulace validované pouze na základě povrchových teplot nelze s jistotou rozhodnout, jak je simulace vzdálena od reálného stavu. To znamená, že např. řízení odlévání na ZPO pomocí hodnoty metalurgické délky získané pouze simulací bez dodatečné validace může způsobit snížení výsledné kvality oceli, nebo dokonce havarijní situaci na lici dráze, tzv. průval. Odstranění následků takovéto poruchy liciho stroje je značně nákladné a zdlouhavé. Ukázka dat z pyrometrického měření je zobrazena na obrázku 2.9-vpravo. Vznik okujů způsobuje měnící se emisivitu povrchu, proto je nutné stejně jako v případě dat z protiprůvalového systému použít vhodnou filtraci měřených dat [48].

Poslední zmiňovanou metodou je validace modelu pomocí radioskopické metody [6]. Tento způsob validace modelu probíhá pomocí radioizotopových částic, které jsou dávkovány přímo do taveniny. Radioaktivní prvky se rovnoměrně rozloží v tavenině a lze je pomocí speciálních metod sledovat. Tato metoda je technicky i ekonomicky ze všech neinvazivních metod nejnáročnější, avšak jako jediná slouží k určení metalurgické délky. Z důvodu přítomnosti radioaktivních izotopů přímo na ZPO se však tato metoda používá pouze ve výjimečných případech a jenom pro výzkumné účely [36].

Validace předkládaného digitálního dvojčete ZPO probíhala dlouhodobě v rámci rozsáhlé spolupráce v několika ocelárnách včetně zahraničních: Evraz Vítkovice Steel, a.s., Třinecké železářny, a.s., Železiarne Podbrezová, a.s., U. S. Steel Košice, s.r.o. a Pohang Iron and Steel Company (POSCO). Díky této úzké spolupráci s reálnými provozy bylo možno dlouhodobě validovat a zpřesňovat digitální dvojčete pro různé geometrie ZPO, různé okrajové podmínky a lici parametry, pro nespočet ocelí s různým chemickým složením, což dokládají například autorovy publikace v kapitole 3.2 a 3.4 [42]



Obrázek 2.9: Vlevo data termočlánků ve stěně krystalizátoru, vpravo data z pyrometrického měření povrchu předlitku včetně filtrace [69]



Obrázek 2.10: Vlevo: Ukázka termovizního měření, Vpravo: umístění pyrometru na ličí trati [69]

[43]. Validace zejména probíhaly pomocí nainstalovaných pyrometrů v různých místech ZPO, pomocí hodnot z termočlánků protiprůvalového systému a pomocí teplotních skenerů a termovizí. Rovněž bylo provedeno radioizotopové měření na bramovém lití o průřezu 250 x 1500 mm. Radioizotopovým zdrojem byl radionuklid Fe 59, 20 MBq. Na měření metalurgické délky byly provedeny celkem čtyři pokusy. Experiment s radioizotopy potvrdil přesnost simulace a ukázal, že model tuhnutí je schopen předpovědět nejen polohu metalurgické délky, ale i tvar tuhnoucího kužele [36]. Validace metalurgické délky vypočtené pomocí digitálního dvojčete byla zásadní, protože metalurgická délka je limitem pro optimalizaci rychlosti lití, tzn. produktivity provozu.

Kapitola 3

Využití digitálního dvojčete a jeho optimalizace

Tato kapitola dokládá tvorbu, potenciál a možnosti využití digitálního dvojčete ZPO. Je sestavena ze sedmi průřezových článků publikovaných v níže uvedených recenzovaných časopisech, které mají impakt faktor podle WOS:



MAUDER, T.; ŠANDERA, Č.; ŠTĚTINA, J.; ŠEDA, M. Optimization of Quality of Continuously Cast Steel Slabs by Using Firefly Algorithm. *Materiali in tehnologije*, 2011, vol. 45, no. 4, p. 347-350. Podíl autora této práce na článku 45 %.
ISSN: 1580-2949. IF 2011:0,804 (Q3).



MAUDER, T.; ŠANDERA, Č.; ŠTĚTINA, J. Optimal Control Algorithm for Continuous Casting Process by Using Fuzzy Logic. *STEEL RESEARCH INTERNATIONAL*, 2015, vol. 86, no. 7, p. 785-798. Podíl autora této práce na článku 70 %.
ISSN: 1611-3683. IF 2015:1,021 (Q2).



MAUDER, T.; CHARVÁT, P.; ŠTĚTINA, J.; KLIMEŠ, L. Assessment of Basic Approaches to Numerical Modeling of Phase Change Problems—Accuracy, Efficiency, and Parallel Decomposition. *JOURNAL OF HEAT TRANSFER-TRANSACTIONS OF THE ASME*, 2017, vol. 139, no. 8, p. 1-5. Podíl autora této práce na článku 40 %.
ISSN: 0022-1481. IF 2017:1,602 (2x Q3).



MAUDER, T.; ŠTĚTINA, J. High Quality Steel Casting by Using Advanced Mathematical Methods. Metals, 2018, vol. 8, no. 12, p. 1-13.

Podíl autora této práce na článku 70 %.

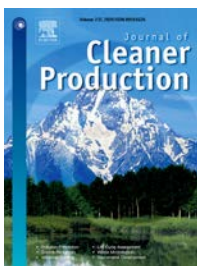
ISSN: 2075-4701. IF 2018:2,259 (Q1/Q3).



BŘEZINA, M.; MAUDER, T.; KLIMEŠ, L.; ŠTĚTINA, J. Comparison of optimization-regulation algorithms for secondary cooling in continuous steel casting. Metals, 2021, vol. 11, no. 2, p. 1-19.

Podíl autora této práce na článku 20 %.

ISSN: 2075-4701. IF 2021:2,695 (Q2/Q3).



KLIMEŠ, L.; BŘEZINA, M.; MAUDER, T.; CHARVÁT, P.; KLEMEŠ, J.; ŠTĚTINA, J. Dry cooling as a way toward minimisation of water consumption in the steel industry: A case study for continuous steel casting. Journal of Cleaner Production, 2020, vol. 275, no. 1, p. 123109-1 (123109-12 p.).

Podíl autora této práce na článku 15 %.

ISSN: 0959-6526. IF 2020:9,297 (3x Q1).



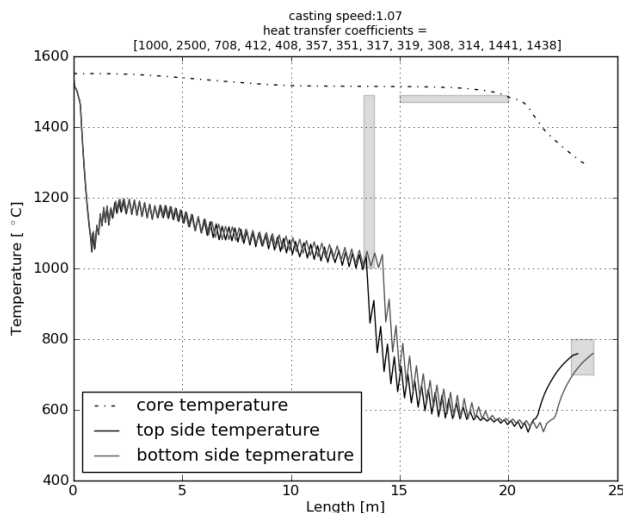
MAUDER, T.; BŘEZINA, M. Reduction of CO₂ Emissions in Steelmaking by Means of Utilization of Steel Plant Waste Heat to Stabilize Seasonal Cooling Water Temperature. Sustainability, 2021, vol. 13, no. 11, p. 1-12.

Podíl autora této práce na článku 70 %.

ISSN: 2071-1050. IF 2021:3,889 (Q2/Q3).

3.1 Optimization of Quality of Continuously Cast Steel Slabs by Using Firefly Algorithm

Tento článek popisuje možnost využití metaheuristického optimalizačního algoritmu inspirovaného přírodními ději v problematice hledání optimálního nastavení ZPO. Autor zvolil nový algoritmus založený na chování hejna světlušek (tzv. Firefly algorithm) [77]. Optimalizační algoritmus je propojen s digitálním dvojčtem ZPO ve smyslu black-box přístupu [76]. Firefly algoritmus byl v problematice optimalizace parametrů ZPO použit vůbec poprvé, z tohoto pohledu jde tedy o unikátní článek.



Obrázek 3.1: 2D teplotní pole předlitku a omezení pro teploty a metalurgickou délku [44]

Algoritmus náhodně vygeneroval N vektorů vstupních parametrů (13 intenzit chlazení pro 13 chladicích okruhů a hodnotu lící rychlosti) a digitální dvojče ZPO pro tyto vstupní parametry napočítalo N řešení (teplotní pole). Dále se stanovila hodnota účelové funkce, pro všechny řešení, jako rozdíl teplot spočítaných digitálním dvojčtem ZPO a teplot požadovaných (optimálních). Rovněž se sledovala hodnota metalurgické délky, která byla z bezpečnostních důvodů omezena. Řešení potom představovalo světlušku a hodnota účelové funkce její intenzitu záření. Světlušky s vyšší intenzitou záření potom k přitahují světlušky ostatní. Podle toho jsou upraveny parametry světlušek pro další výpočet digitálního dvojčete ZPO. Nové řešení pro iteraci $n + 1$ je potom vždy dáno předpisem [77]

$$\mathbf{x}_i^{n+1} = \mathbf{x}_i^n + \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2} (\mathbf{x}_j^n - \mathbf{x}_i^n) + \alpha \boldsymbol{\epsilon}_i. \quad (3.1)$$

Mezi jakýmkoliv dvěma světluškami \mathbf{x}_i a \mathbf{x}_j majícími souřadnice v kartézském souřadném systému lze stanovit vzdálenost mezi nimi jako $r_{ij} = \|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{i,k} - x_{j,k})^2}$. První člen pravé strany rovnice (3.1) vyjadřuje původní polohu světlušky i . Druhý člen vyjadřuje přitažlivost ke světlušce j . Třetí člen obsahuje náhodný parametr α . Symbol $\boldsymbol{\epsilon}_i$ označuje vektor náhodných čísel daný normálním rozdělením nebo rovnoměrným rozdělením pravděpodobnosti. Pro většinu aplikací můžeme dosadit $\beta_0 = 1$ a $\alpha \in [0, 1]$. V případě $\beta_0 = 0$ jde o tzv. náhodnou procházku. Parametr γ mění přitažlivost světlušek a jeho hodnota je kritická z pohledu rychlosti konvergence řešení a tedy ovlivňuje celé chování algoritmu. Teoreticky může tato hodnota ležet v intervalu $\gamma \in (0, \infty)$, v praxi se však většinou nastavuje mezi hodnotami 0,1 až 10.

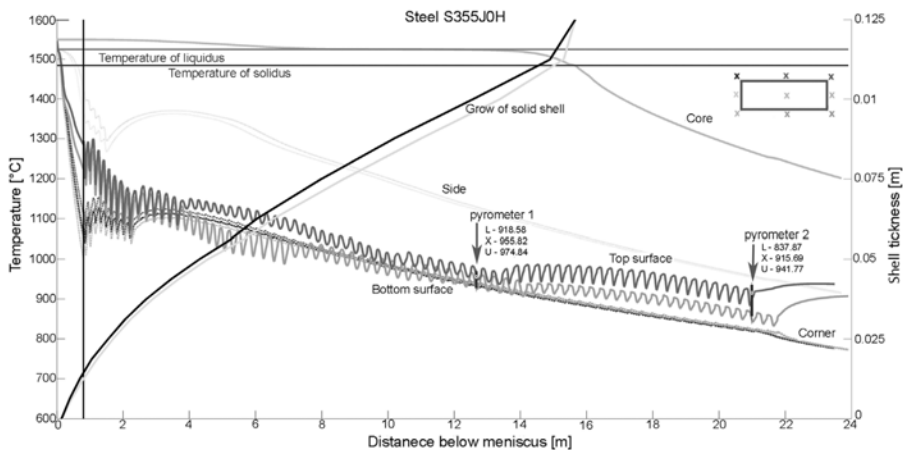
Pro testování optimalizačního algoritmu bylo speciálně vytvořeno 2D digitální dvojče ZPO. K otestování stability a univerzálnosti optimalizačního algoritmu bylo zvoleno několik druhů ocelí s různým chemickým složením a několik druhů omezení na povrchové teploty a na hodnotu metalurgické délky. Hlavním cílem algoritmu bylo nalezení maximální možné lící rychlosti při zachování

omezujících teplotních podmínek. Bylo dosaženo nejenom optimálního výsledku, ale navíc byl tento výsledek dosažen i s relativně malým počtem světlušek a malým počtem iterací. Lze tedy konstatovat, že pro tento typ úloh Firefly algoritmus konverguje k optimu rychle i při menším počtu světlušek, tzn. s menšími výpočetními nároky. Výsledek lze vidět na obrázku 3.1.

Firefly optimalizační algoritmus se tak ukázal být na tento problém vhodnou volbou. Nicméně jeho další nasazení na 3D digitální dvojčete ZPO již vyžadovalo kvůli komplexnosti (nelinearitě) v okrajových podmínkách mnohem více opakovaných optimalizačních iterací a větší počet použitých světlušek. Tím extrémně narůstal výpočetní čas a bylo nutné hledat jiný druh řešení.

3.2 Optimal Control Algorithm for Continuous Casting Process by Using Fuzzy Logic

Tento článek v úvodu popisuje současný stav poznání v oblasti digitalizace procesu plynulého lití a navazujících optimalizačních technik. Článek je rozdělen do dvou hlavních sekcí. První část představuje původní matematický popis problému, včetně numerické diskretizace (byla zvolena Alternující Explicitní metoda ADE s testem nezávislosti sítě) a detailního popisu okrajových podmínek (druhy použitých trysek a jejich umístění). Tedy tvorbu digitálního dvojčete ZPO podle reálného lícího stroje firmy EVRAZ VÍTKOVICE STEEL, a.s. V první části článku je rovněž ukázána verifikace digitálního dvojčete pomocí dvou pyrometrů snímajících teploty na horním povrchu předlitku, viz obrázek 3.2.

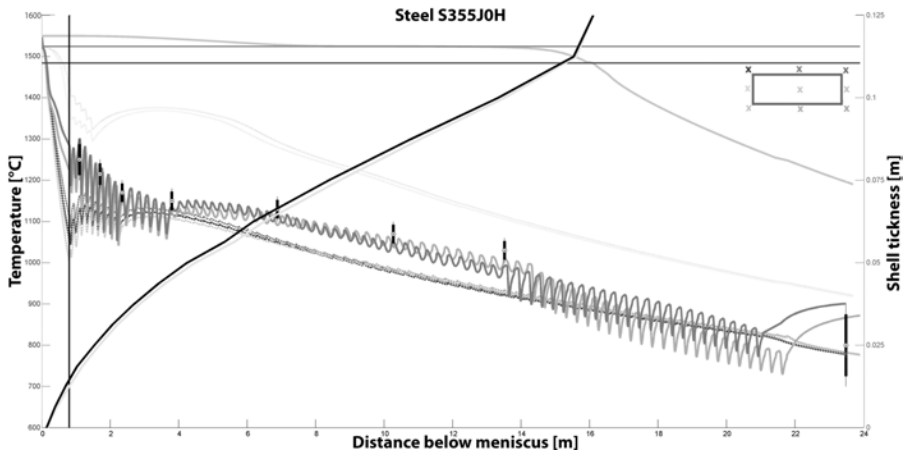


Obrázek 3.2: Ukázka verifikace virtuálního dvojčete pomocí pyrometrů [42]

Další část se věnuje optimalizačnímu modelu, který již nekomunikuje s digitálním dvojčetem ZPO ve smyslu přístupu black-box, ale obsahuje vyšší logiku poznání procesu lití. Tato logika vychází z jednoduchého lidského uvažování a to: JESTLIŽE je teplota na povrchu příliš vysoká PAK přidej v tomto a předcházejících místech ZPO intenzitu chlazení, JESTLIŽE je teplota na povrchu příliš nízká PAK uber v tomto a předcházejících místech ZPO intenzitu chlazení, JESTLIŽE je teplota na povrchu v optimálním teplotním intervalu PAK nic nevykonávej. Autor navrhl a sestavil původní optimalizačně-regulační algoritmus založený na fuzzy logice [78], která je schopna simulovat lidské uvažování a tím nalézt optimální řešení v rychlejším čase, než je schopen algoritmus založený na black-box přístupu. Vstupem pro fuzzy regulátor je optimální rozložení povrchových teplot, které by mělo být voleno s ohledem na druh oceli tak, aby byla dosažena požadovaná výsledná kvalita oceli. Dalším vstupem do fuzzy regulátoru je hodnota metalurgické délky, která nesmí být překročena z důvodu bezpečnosti. Fuzzy regulace pak hledá optimální nastavení lící rychlosti za účelem zvýšení

produktivity výroby. Jde tedy o kombinaci optimalizace zvyšující kvalitu odlitých výrobků a zároveň zvyšující produktivitu procesu.

Optimalizace byla provedena na 3D komplexním digitálním dvojčeti ZPO a bylo nalezeno nové rozložení teplotního pole, které je zobrazeno na obrázku 3.3. V tomto případě byla téměř dosažena maximální povolená hodnota metalurgické délky, což indikuje maximální možnou produktivitu lití. Rovněž je vidět, že všechny požadované limity hodnot povrchové teploty byly ve všech kontrolních bodech (kontrolní bod je vždy umístěn za každý chladicí okruh) splněny (povrchové teploty prochází krabicovými grafy).



Obrázek 3.3: Teplotní rozložení po optimalizaci [42]

Důležitou otázkou pro operátora reálného lícího stroje je nastavení optimálního chlazení pro různé hodnoty lící rychlosti, která se v průběhu dynamického procesu mění a je třeba na tuto změnu reagovat. Rovněž pro různé velikosti odlévaného předlitku je třeba nalézt nové hodnoty chlazení. Na závěr článku je pak ukázka optimálních chladících křivek (získaných pomocí kombinace fuzzy regulace a digitálního dvojčete ZPO) v provozním intervalu lících rychlostí pro různé velikosti předlitku. Tyto hodnoty jsou získány pro stacionární stavy. V případě dynamických změn dochází k dopravnímu zpoždění systému a je nutné s těmito hodnotami pracovat obezřetně [42].

Přístup kombinace fuzzy regulace spolu s digitálním dvojčetem se ukázal jako velmi užitečný a byl dále rozvíjen pro různé geometrie ZPO a zejména pro optimální řízení při dynamických změnách parametrů lití.

3.3 Assessment of Basic Approaches to Numerical Modeling of Phase Change Problems — Accuracy, Efficiency, and Parallel Decomposition

Digitalizace procesu plynulého lití oceli na ZPO pomocí modelu digitálního dvojčete založeného na numerické matematice je spojena s otázkou přesnosti, efektivnosti a robustnosti. Numerické modelování procesu plynulého lití je v podstatě problémem přenosu tepla se změnou fáze (nelineární problém, viz kapitola 2.4). Je nutné dobře zvolit jak numerickou metodu, tak metodu na modelování změny fáze. Tento článek porovnává čtyři metody numerické diskretizace se třemi metodami modelování změny fáze, navíc pro čtyři různé hustoty výpočetní sítě. V porovnání je nabídnuta i varianta výpočtu dekomponované sítě na více procesorech nebo při použití grafické výpočetní karty GPU. Jako nejvíce přesnou metodou pro 1D případ (porovnávaný s analytickou metodou) se ukázala numerická alternující implicitní metoda ADI s modelováním změny fáze pomocí tzv. metody

teplotního zotavení (tzv. Temperature recovery) [16]. Ve 3D již byla nejméně úspěšnější entalpická metoda [70] s využitím jednoduchého explicitního schématu (tzv. simple explicit) SE popř. alternující explicitní schéma ADE [47]. S využitím paralelizace výpočtu byla nejméně úspěšnější metoda SE počítaná na grafické kartě GPU [41]. Výsledky výpočtů jsou uvedeny na obrázku 3.4.

Numerical scheme	Efficiency—computation time (s)		
	Enthalpy method	Effective heat capacity	Temperature recovery
Very-coarse-mesh			
SE	1.93	1.10	8.66
ADE	1.81	6.51	2.82
SI	9.55	14.05	11.40
ADI	7.47	15.36	9.16
Coarse-mesh			
SE 1CPU/12CPU	11.54/135.28	21.35	71.98
ADE	27.02	80.87	79.10
SI	83.38	309.74	333.35
ADI 1CPU/12CPU	41.80/58.61	176.85	271.61
SE GPU	18.67	—	—
Fine-mesh			
SE 1CPU/12CPU	887.14/1 122.13	1051.11	1926.70
ADE	2359.07	3461.83	4331.50
SI	3251.27	7929.16	9517.30
ADI 1CPU/12CPU	714.73/824.32	6109.06	7809.40
SE GPU	97.72	—	—
Very-fine-mesh			
SE 1CPU/12CPU	54 362.19/35 124.51	—	—
ADI 1CPU/12CPU	36 210.45/32 416.32	—	—
SE GPU	972.49	—	—

Obrázek 3.4: Výpočetní čas pro různé druhy výpočtových schémat a metod modelování fázové změny [41]

Hůře paralelizovatelné implicitní metody počítané i na několika procesorech (pro jemné výpočetní sítě) byly sice přesnější, ale v rychlosti oproti kombinaci SE na GPU nebyly schopné konkurence [41]. Cílem virtuálního dvojčete ZPO je vytvořit velmi přesnou kopii reálného lití, tzn. numerický model s velmi jemnou výpočetní sítí, která bude schopna provádět výpočty v reálném čase nebo dokonce přepočítávat stavy budoucí. Kombinace explicitních numerických metod s entalpickou metodou na modelování změny fáze s jejím GPU ekvivalentem se tak stala hlavním směrem tvorby digitálního dvojčete ZPO.

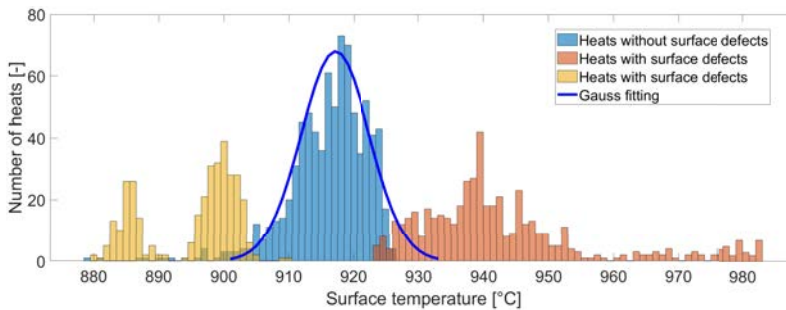
3.4 High Quality Steel Casting by Using Advanced Mathematical Methods

Autor rozšiřuje obsah článku 3.1 [44] ve smyslu rozšíření výpočetního jádra digitálního dvojčete ZPO a to zejména o masivní paralelizaci počítanou na grafické procesorové jednotce GPU. Pro ověření předpokladu využitelnosti GPU podle článku 3.3 [41] výpočet probíhal pro tři rozdílné hustoty numerické sítě (10 000, 100 000 a 1 000 000 výpočetních uzlů) a dvě numerické metody SE a ADI počítané na jednom či více procesorech. Výsledek přináší obrázek 3.5. Smysl této paralelizace výpočtu je zejména v dosažení takové rychlosti výpočtu, která bude předstihovat i pro jemné numerické sítě čas reálný. Digitální dvojčete ZPO, které dokáže provádět výpočty rychleji, než je čas reálný dokáže předpočítávat budoucí teplotní rozložení a na základě budoucího výsledku učinit změnu v licích parametrech okamžitě. Mluvíme tak o prediktivním řízení procesu.

Numerical Scheme	Computational Time (s)		
	Coarse mesh	Fine-mesh	Very-fine mesh
SE—1 CPU	11.54	887.14	54,362.12
SE—12 CPU	135.28	1122.13	35,124.54
ADI—1 CPU	41.81	714.73	36,210.41
ADI—12 CPU	58.61	824.32	32,416.32
SE—GPU	18.67	97.72	972.49

Obrázek 3.5: Výpočetní čas pro různé hustoty vypočtení sítě a pro dvě numerická schémata schémat [43]

Unikátnost článku je rovněž v hledání možné odpovědi na otázku, jak je vhodné nastavit povrchové teplotní limity pro konkrétní značku oceli tak, aby byla dosažena požadovaná kvalita předlitku (minimalizace vnitřních a povrchových trhlin). Z pohledu složitosti procesu lití oceli, kdy dochází při změně fáze k tvorbě tuhoucích krystalů, segregací, tepelného zpracování je téměř nemožné na základě licích parametrů předpovídat finální kvalitu ztuhlého ocelového polotovaru. V tomto článku je ukázán statistický přístup, kdy je pomocí statistického vyhodnocení reálných provozních dat pro jednu značku odlévané oceli S355 sledováno, jestliže došlo k tvorbě povrchových trhlin či nikoliv (celkově bylo statisticky zpracováno přes 2000 taveb). Obrázek 3.6 ukazuje statistické vyhodnocení povrchových teplot, měřených v místě rovnání předlitku, názorně rozdělených podle vzniku vady. Tavy kde nebyl vznik vady pozorován jsou proloženy hustotu pravděpodobnosti normálního rozdělení, se střední hodnotou 916,03 °C a rozptylem 6,89 °C.



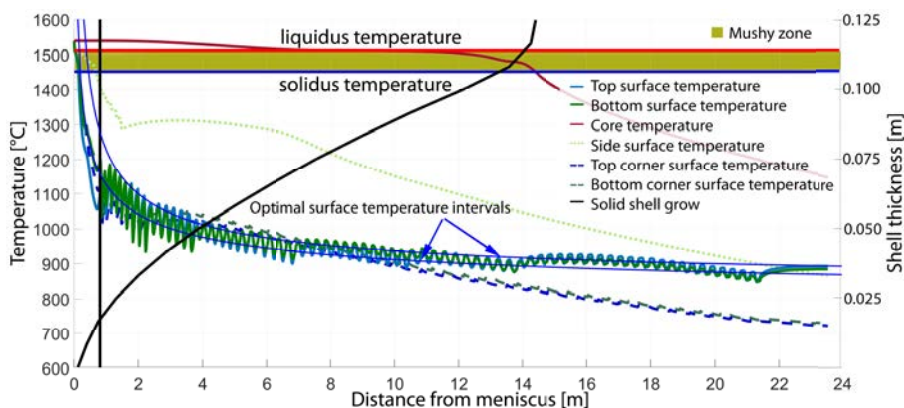
Obrázek 3.6: Třídění sledovaných taveb podle vzniku vady a teploty v místě rovnání [43]

Statistická data sloužila jako základ pro nastavení optimálních povrchových teplot, podle kterých musel fuzzy regulátor regulovat intenzitu chlazení pro libovolnou licí rychlost. Výsledné teplotní pole je pak zobrazeno na obrázku 3.7. Zde je vidět, že podmínka udržení povrchových teplot je splněna.

Článek uzavírá ukázkou využití fuzzy regulace a digitálního dvojčete ZPO pro optimalizaci dynamických změn licích parametrů. Konkrétně jde o simulaci poklesu licí rychlosti z 1,5 na 1,2 m/min na přibližně 8 minut (která může odpovídat např. rychlé výměně mezipánve). Na tuto změnu musí reagovat operátor změnou intenzity chlazení v sekundární chladicí zóně. Fuzzy regulátor prokázal, že s jeho použitím dochází k minimálním povrchovým teplotním výkyvům a tedy kvalita odlévané oceli by měla zůstat zachována [43].

3.5 Comparison of optimization-regulation algorithms for secondary cooling in continuous steel casting

Tento článek ukazuje další možnosti využití optimalizačních algoritmů pro digitální dvojče ZPO a rozšiřuje článek 3.1 [44]. Pro účely testování optimalizačních algoritmů byl speciálně vytvořen nový



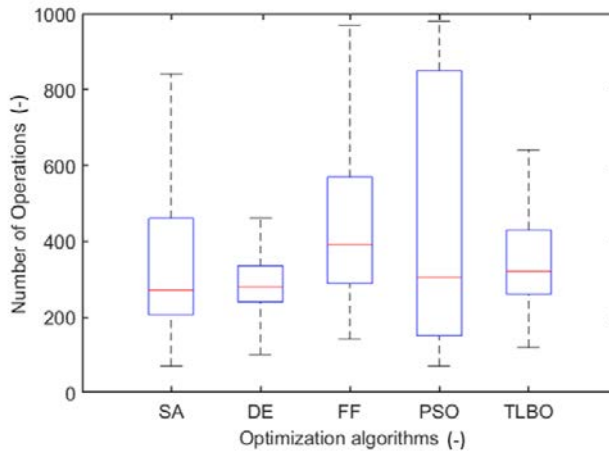
Obrázek 3.7: Výsledek optimalizace chlazení ZPO s teplotními limity [43]

2,5 D model (tzv. slice model) [9], a to zejména pro jeho rychlé vyhodnocení bez nutnosti paralelizace. Autoři využívají různé optimalizační techniky v problematice plynulého lití, ale z důvodu rozdílnosti jejich digitálních dvojčat ZPO jsou však rozdílné přístupy neporovnatelné. Unikátnost tohoto článku je v porovnání různých optimalizačních algoritmů na jednom digitálním dvojčeti ZPO a popřípadě tak nalézt vhodnou alternativu k fuzzy regulaci při hledání optimálních licích parametrů ZPO. Z každého typu optimalizačních technik byly zvoleny jeden až dva algoritmy. Z evolučních algoritmů byla zvolena metoda diferenciální evoluce, z fyzikálně orientovaných algoritmů metoda simulovaného žhání, z hejnových algoritmů potom světlučí algoritmus a optimalizace hejnem částic a závěrem algoritmus z kategorie algoritmů založených na lidském usuzování teaching-learning optimalizace [77].

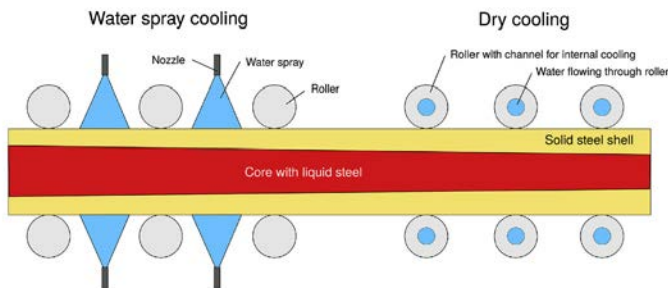
Důležitým faktorem je rychlost konvergence těchto algoritmů k optimálnímu řešení a pak samozřejmě výpočetní čas. Porovnání algoritmů z hlediska průměrného počtu výpočetních iterací (volání dvojčete ZPO) je na obrázku 3.8, ze kterého je vidět, že nejúspěšnější je metoda diferenciální evoluce. Dobře dopadla i metoda teaching-learning, která má tu výhodu, že nepotřebuje nastavovat žádné vnitřní parametry optimalizačního algoritmu [77]. Každá z těchto metod však potřebovala značné množství opakovaného volání digitálního dvojčete ZPO, nedosáhla tak na výsledky obdržené pomocí přístupu fuzzy regulace, která je tak dále hlavním optimalizačním algoritmem předkládaného digitálního dvojčete ZPO.

3.6 Dry cooling as a way toward minimisation of water consumption in the steel industry: A case study for continuous steel casting

Předkládané články 3.1 - 3.5 [9], [41], [42], [43], [44] se zaměřují na tvorbu digitálního dvojčete ZPO a na možnosti jeho optimalizace z pohledu kvality a produktivity procesu. Originalita tohoto článku však spočívá v dalším možném využití digitálního dvojčete ZPO a to na tzv. prototypování rekonstrukcí samotného zařízení. Cílem článku bylo navrhnout chladicí systém pro sekundární chladicí sekci pomocí tzv. suchého chlazení, kdy jsou v sekundární chladicí zóně některé soustavy chladících trysek nahrazeny vnitřně chlazenými válci (jde o chladicí okruhy, které jsou umístěny 5 m a dále od hladiny oceli v krystalizátoru). Rozdíl mezi vodním/vodo-vzdušným chlazením a suchým chlazením je zobrazen na obrázku 3.9. Hlavní význam takové náhrady je pak v úspoře vody, která je využita v uzavřené chladicí smyčce a nedochází k jejímu odpaření a ztrátě při chlazení. Jde tedy o tzv. ekologickou optimalizaci, tedy optimalizaci, jejímž cílem je úspora vodních zásob a snížení uhlíkové stopy.



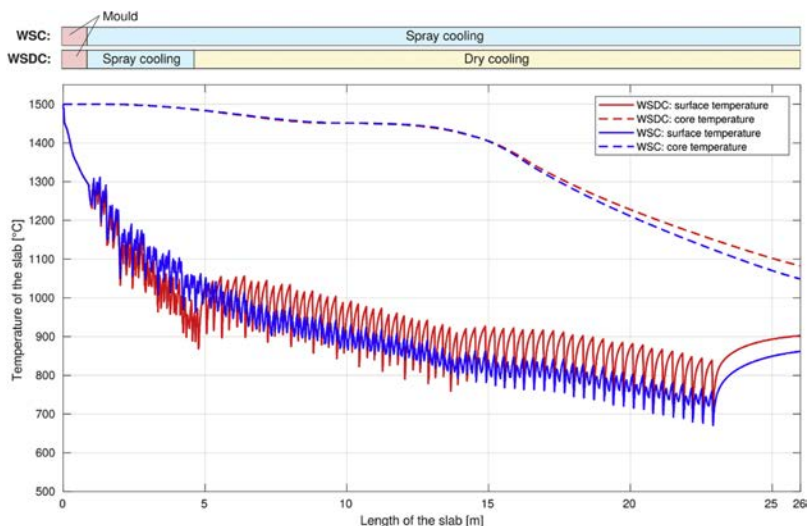
Obrázek 3.8: Porovnání optimalizačních přístupů [9]



Obrázek 3.9: Schematicky znázorněné klasické a suché chlazení [37]

Hlavním kritériem bylo mít v obou režimech chlazení střední teplotní průběhy na povrchu a ve středu předlitku identické, tak aby v případě chlazení vodními válci nedošlo ke zhoršení kvality odlévané oceli. Výsledek teplotního výpočtu jsou graficky na obrázku 3.10 (WSC - chlazení pomocí trysek, WSDC - chlazení v kombinaci trysek a suchého chlazení). Z obrázku lze pozorovat, že povrchové teploty prvních chladících sekcí jsou obdobné, protože jsou v obou případech použity chladící trysky. Ve vzdálenost 5 m od hladiny oceli se výsledky mírně rozcházejí. Povrchová teplota při použití suchého chlazení na první pohled více osciluje, její střední hodnota má však stejný průběh jako v případě chlazení pomocí trysek. Tento výsledek byl dosažen opět pomocí fuzzy regulace.

Výsledky článku pak shrnuje tabulka 3.11, ze které je zřejmá značná úspora spotřeby chladící vody při dosažení ekvivalentního chlazení předlitku. Tím článek zároveň prokázal další možnost využití digitálního dvojčete ZPO ve smyslu ekologické optimalizace, což je jeho hlavním originálním přínosem. Využití suchého chlazení při odlévání oceli je stále více zastoupeno, i když zatím spíše využíváno při odlévání tzv. tenkých bram, proto využití digitálního dvojčete ZPO má stále větší potenciál.



Obrázek 3.10: Teplotní průběhy pro klasické a suché chlazení [37]

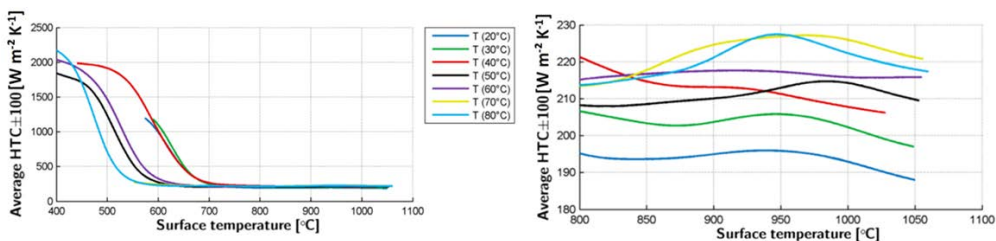
	Water flow rate for cooling [L/min]		
	Total	Closed-loop	Once-through
WSC scenario	9166	6000/65%	3166/35%
WSDC scenario	34,417	32,784/95%	1633/5%
WSDC-to-WSC ratio	3.75	5.46	0.52

Obrázek 3.11: Porovnání spotřeby vody při klasickém a suchém chlazení při opětovném využití vody [37]

3.7 Reduction of CO₂ Emissions in Steelmaking by Means of Utilization of Steel Plant Waste Heat to Stabilize Seasonal Cooling Water Temperature

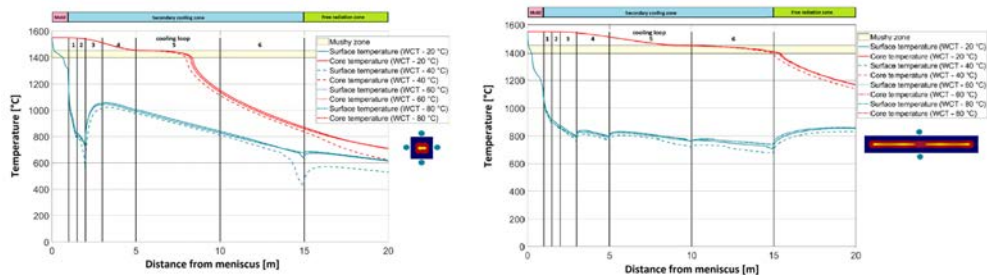
Tento článek se rovněž věnuje využití digitálního dvojčete ZPO pro ekologickou optimalizaci procesu plynulého lítí a snížení CO₂ emisí. V případech, kdy by nebylo možné použít suché chlazení, jak popisoval článek 3.4 [37] je nezbytné se zabývat podrobněji procesem vodního chlazení a sledovat parametry, které toto chlazení ovlivňují. Z mnoha výzkumných prací je znám vliv Leidenfrostova efektu na intenzitu chlazení [60]. Tzv. Leidenfrostova teplota silně závisí na povrchové teplotě chlazeného objektu. Některé výzkumy však ukazují, že na její hodnotu může mít vliv i teplota chladicího média [26]. V Laboratoři přenosu tepla a proudění FSI VUT v Brně, byly experimentálně změřené průměrné součinitele přestupu tepla v závislosti na teplotě povrchu chlazeného objektu a teplotě chladicího média, viz obrázek 3.12. Podle výsledků experimentu má teplota chladicí vody přímý vliv na průměrný součinitel přestupu tepla pod tryskou a to jak v nízkoteplotní oblasti 3.12-vlevo tak ve vysokoteplotní oblasti 3.12-vpravo.

Výsledky experimentu byly vloženy jako okrajové podmínky do digitálního dvojčete ZPO. Následné simulace byly provedeny pro sochorové i bramové ZPO, přičemž jejich výsledky jsou na obrázku 3.13. Zejména z rozložení teplot na povrchu sochoru je patrné, že teplota vody má na teplotní rozložení předlitku přímý vliv (zejména pro případ sochorového lítí, kde se teploty povrchu pohybují běžně pod Leidenfrostovou teplotou). Tento poznatek by mohl souviset ze zkušeností ocelářských podniků, které zaznamenávají, že pro stejnou značku oceli a stejné parametry licího stroje vykazují



Obrázek 3.12: Výsledek výpočtu teplotního pole pro různé teploty chladicí vody [45]

předlitky různé vady a jejich četnost se v letní a v zimní sezoně statisticky rozchází. Výsledky článku predikují, že je tento jev způsoben parametry chladicí vody odebírané z okolních zdrojů, která má v letní a v zimní sezoně rozdílnou teplotu.



Obrázek 3.13: Výsledek výpočtu teplotního pole pro různé teploty chladicí vody [45]

Ekonomicky dohřívát chladicí vodu a udržovat jí na konstantní teplotě však nemá význam. Proto článek dále navrhuje využití odpadního tepla z ocelárny na předeřev chladicí vody [45]. Tím by byla zaručena její konstantní teplota po celý rok, což by mohlo vést ke zvýšení kvality odlévané oceli a lepší stabilitě procesu. Pro vyšší teploty chladicího média se navíc dle výsledků článku nabízí možnost snížení průtoků chladicí vody a tím dosáhnout její úspory, což opět spadá do ekologické optimalizace.

Kapitola 4

Závěr

Tato práce shrnuje možnosti a výhody využití digitálního dvojčete zařízení pro plynulé odlévání oceli (ZPO). Plynulé lití oceli je komplexním výrobním procesem obsahující zejména přenos tepla a látky za přítomnosti změny fáze kapalina-mushy zóna-pevná fáze. Digitální dvojče ZPO je založeno na matematickém modelu, který numericky řeší tzv. Fourierovu-Kirghoffovu rovnici (parciální diferenciální rovnici 2. řádu), která pracuje s nelineárními parametry a s nelineárními okrajovými podmínkami. Praktické aplikaci předcházela dlouholetá verifikace vytvořeného digitálního dvojčete s reálnými procesy lití přes různé instalace ZPO, různé chemické složení odlévaných ocelí a různé okrajové podmínky. Další evolucí digitálního dvojčete bylo vytvoření optimalizačních/regulačních algoritmů na hledání optimálních licích parametrů za účelem zvýšení produktivity výroby a snížení výrobních vad. Za tímto účelem byl vytvořen původní fuzzy regulátor, který ve svém výkonu překonal nespočet testovaných heuristických optimalizačních přístupů. V postupném vývoji digitální dvojče ZPO dospělo do fáze, kdy je jeho výpočetní jádro masivně paralelizováno na GPU. Paralelizace zvýšila, pro jemné výpočetní sítě, výpočetní rychlost až cca. 50-krát a našla řešení výrazně rychleji, než je reálný čas. V kombinaci s fuzzy regulací je pak představen komplexní model prediktivního řízení procesu plynulého lití, který reguluje intenzitu chlazení podle budoucího teplotního vývoje. Kromě využití ve smyslu zvyšování produktivity a kvality odlévané oceli se pro využití digitálního dvojčete hledal další potenciál, který byl nalezen v možnosti úspor vodních zdrojů, které jsou v procesu lití nezbytné k řízenému chlazení. Byla tak představena ekologická optimalizace s využitím digitálního dvojčete ZPO.

Výpočetní jádro digitálního dvojčete bylo odděleno od vstupní uživatelské vrstvy, která pak jednoduše implementuje rozdílné geometrie ZPO a další vstupní parametry pro konkrétní licí stroj. Tím se z původního modelu stal univerzální nástroj pro digitalizaci procesu lití. Pro uživatele bylo vytvořeno grafické rozhraní, které je možné ovládat pomocí dotykového tabletu a tím integrovat původní model do řídicího systému v souladu s filozofií Průmysl 4.0. Integrace digitálního dvojčete do systémů ocelárny rovněž umožňuje spolu s daty měřeními ukládat i velké množství dat ze simulace. Další statistická práce s takto získanými daty pomáhá hledat úzká místa procesu a pomocí shlukové analýzy hledat další spojitosti mezi parametry lití a výstupní kvalitou oceli.

Za dobu vývoje digitálního dvojčete ZPO bylo vytvořeno několik verzí původního modelu, které se postupně více přibližovali realitě. Tím však rostla náročnost na výpočetní kapacitu (složitý model se složitými okrajovými podmínkami vyžaduje velice jemnou výpočetní síť). Navíc testované optimalizační algoritmy vyžadovaly opakované přepočítávání modelu, čímž se kombinace přesného 3D modelu a optimalizačního algoritmu stala ve smyslu nalezení optima v reálném čase nepoužitelná. Tento problém se podařilo překonat překlopením a paralelizací výpočetního jádra na GPU. Časová úspora pro velmi jemné výpočetní sítě předčila všechny původní očekávání. Pro případ, kdy není k dispozici výpočetní stanice s grafickou kartou umožňující paralelní výpočty, byla vytvořena 2,5D verze modelu (parametricky nastavena tak, aby co nejvíce svými výsledky odpovídala výsledkům 3D modelu), která je rovněž schopna vypočítat teplotní rozložení předlitku několikanásobně rychleji, než je reálný čas. To znamená, že je možné reagovat s předstihem na dynamické změny v licích parametrech a tím zachovávat kvalitu oceli na požadované úrovni.

Hlavním cílem vývoje digitálního dvojčete ZPO bylo nalezení optimálních parametrů lití (zejména jde o intenzitu chlazení v sekundární chladicí zóně, licí rychlost, licí teplotu apod.), které zajistí vysokou produktivitu procesu lití a zároveň tato produktivita nebude mít negativní vliv na výslednou kvalitu oceli. Popř. pakliže je kvalita oceli nedostatečná, jsou hledány takové parametry chlazení, aby byla zvýšena. Za tímto účelem byla testována řada optimalizačních a regulačních technik. Vzhledem k rychlosti a kvalitě dosažených výsledků byl nalezen a poté modifikován algoritmus založený na fuzzy logice a metodě prediktivního řízení. Tento přístup se zejména osvědčil při sledování dynamických změn v procesu lití, kterými se obecně velká část autorů nevěnuje. Jsou to však velice často právě dynamické změny v procesu, které způsobují větší či menší vady na odlité oceli. Zlepšení procesu lití pomocí digitálního dvojčete ZPO spolu s optimalizačním/regulačním algoritmem pak rovněž vede ke snížení ekologické stopy výroby oceli, což byla dlouho opomíjená oblast. Dnes však s rozvíjející se ekologickou legislativou (např. Zelená dohoda pro Evropu angl. European Green Deal) začíná být toto téma velmi diskutované a aktuální. Výroba oceli je ekologicky náročným procesem, bez ní si však nedokážeme představit moderní život.

V případě aplikace digitálního dvojčete do reálného provozu lze dosáhnout následujících benefitů:

- Zvýšení produktivity lití a tím snížení výrobní doby, což vede nejen ke zvýšení ekonomických parametrů ale rovněž ke snížení emisí skleníkových plynů.
- Hledání licích parametrů, které zachovají v teplotní rovině děj lití konstantní a tím nebude docházet ke snižování kvality oceli ani v případě dynamických změn. Tento faktor je klíčový k udržení konkurenceschopnosti firmy. V případě odlití nekvalitní oceli dochází často k sešrotování, roztavení a nutnosti opakování procesu lití. Předcházení těchto situací opět vede ke snížení emisí skleníkových plynů.
- Snížení množství vody potřebné pro chlazení je dalším krokem ke snížení ekologické stopy procesu. Predikce stavu vodních zdrojů vzhledem k očekávaným dopadům klimatických změn ukazuje scénáře, že voda jako strategická surovina bude nedostatková a jakékoliv její úspory ve výrobním řetězci budou nezbytné.
- Prototypování v odlévání nových druhů ocelí na základě jejich chemického složení. Ocelárny v EU a USA nemohou konkurovat produkci oceli v Číně. Jediná konkurence je možná v odlévání speciálních druhů ocelí s vysokou přidanou hodnotou. Jejich výroba je ale náročná a hledání vhodného nastavení licích parametrů metodou pokus omyl by vedlo k obrovské zmetkovitosti a s tím spojené neekologičnosti. S digitálním dvojčetem ZPO je možné nalezení optimálního nastavení licího stroje a následná výroba nových značek ocelí potom již probíhá v optimálních licích podmínkách.
- Konstrukční úpravy samotného ZPO, kdy je možné pomocí digitálního dvojčete hledat optimální způsoby chlazení předlitku, např. typ nebo rozložení chladících trysek, využití suchého chlazení apod.
- Získání, ukládání a statistické vyhodnocení dat ze simulace, které mohou doplnit data měřena/provozní. Výsledkem pak může být ucelený obraz procesu lití, který může sloužit pro jeho lepší pochopení a jeho další optimalizaci.

Digitální dvojče ZPO je již finálním produktem a případné modifikace probíhají pouze na přání zákazníka a jeho specifické požadavky. V rámci projektu GAČR (GA 19-20802S) byl v nedávné době teplotní model úspěšně propojen s modelem mechanickým (pro výpočet mechanického a teplotního napětí a namáhání). Ukázala se tak další potenciální cesta k ještě hlubšímu pochopení problematiky plynulého lití a vzniku trhlin a vad. Do řešení toho výzkumného úkolu byl zapojen průmyslový partner Třinecké Železárny a.s., který poskytl data o teplotním průběhu lití velkých válcových profilů a data ze systému hlídání kvality. Jedná se tak zřejmě o další cestu v rozšíření digitálního dvojčete ZPO a alternativu k hledání optimálního licího stavu pomocí statistického vyhodnocení výrobních dat, tak jak bylo prezentováno v kapitole 3.4 [43].

Autor této práce vytvořil výpočetní numerické jádro digitálního dvojčete ZPO. Porovnal dostupné metody numerické diskretizace sítě a dostupné metody pro výpočet změny fáze s pohledu

výpočetní efektivity, robustnosti řešení, přesnosti a paralelizovatelnosti. Provedl rozsáhlou verifikaci modelu pomocí reálných výrobních dat, zejména pro bramové lití ve spolupráci s firmou Evraz Vítkovice Steel, a.s., a pro sochorové lití potom s firmou Třinecké železářny, a.s. Vytvořil a porovnal výsledky několika optimalizačních algoritmů pro nalezení optimálního nastavení ZPO. Vytvořil numerické jádro s možností paralelizace na CPU/GPU. Navrhl a vytvořil původní fuzzy regulační přístup na optimální řízení procesu lití. Výsledky simulací digitálního dvojčete ZPO použil v rámci několika projektů základního výzkumu GAČR (GACR 106/09/0940, GAR P107/11/1566, GA15-11977S, GA 19-20802S) a v interních projektech FSI VUT v Brně (FSI-J-10-8, FSI-J-11-7, FSI-J-12-22, FSI-J-13-1977). V rámci kontrahovaného výzkumu vytvořil off-line model digitálního dvojče ZPO pro lití tenkých bram spolu s grafickým uživatelským rozhraním pro Jihokorejskou firmu Pohang Iron and Steel Company (POSCO) (HS13457086). Navrhl úspěšnou výměnu chladících trysek na bramovém ZPO firmy Evraz Vítkovice Steel, a.s. Po této výměně došlo k lepší regulaci teplot v místě rovnání předlitku což u vybraných značek ocelí statisticky zvýšilo jejich kvalitu. Výsledky pak publikoval v řadě mezinárodních recenzovaných časopisů s impakt faktorem podle WOS a na mnoha celosvětových, evropských a národních konferencích zabývajících se problematikou zpracování oceli, přenosu tepla a optimalizace výrobních procesů.

Literatura

- [1] ALIZADEH, M.; EDRIS, H.; SHAFYEI, A. Mathematical Modeling of Heat Transfer for Steel Continuous Casting Process. In *International Journal of ISSI*. Isfahan, Iran : ISSI, 2006. s. 7 - 16.
- [2] AUGUSTO, Juan Carlos, ed. Handbook of Smart Cities: 1st ed. 10.07.2021. IOS Press, 2021. ISBN 978-3030696979.
- [3] BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY, C. M. *NONLINEAR PROGRAMMING - Theory and Algorithms*, Third Edition, New Jersey, Willey and Sons, 2006, 8553 p. ISBN-13 978-0-471-48600-8.
- [4] BIRAT, Jean-Pierre, et al. *The Making, Shaping and Treating of Steel: Casting Volume : 11th. EDITION*. ALAN W. CRAMB. Pittsburgh, PA, USA : The AISE Steel Foundation, 2003. 1000 s. ISBN 0-930767-04-7.
- [5] BOUHOUCHE, Salah; LAHRECHE, Malek; BAST, Jürngen. Control of Heat Transfer in Continuous casting Process Using Natural Networks. *ACTA AUTOMATICA SINICA*. 2008, 34, s. 701 - 706. ISSN 0254-4156.
- [6] BÖHM, ZDENĚK, et al. *Plynulé Odlévání Oceli*. Praha : SNTL, 1992. 448 s. ISBN 80-03-00661-9.
- [7] BOWMAN, Horace Dale. *History and Development of the Steel Industry*. ILLINOIS, 1910. Master Thesis. University of Illinois.
- [8] BRDIČKA, Bořivoj. 4. průmyslová revoluce. Metodický portál: Spomocník [online]. 02. 05. 2016, [cit. 2022-06-06]. Dostupný z WWW: <<https://spomocnik.rvp.cz/clanek/20857/4-PRUMYSLOVA-REVOLUCE.html>>. ISSN 1802-4785.
- [9] BŘEZINA, M.; MAUDER, T.; KLIMEŠ, L.; ŠTĚTINA, J. Comparison of optimizationregulation algorithms for secondary cooling in continuous steel casting. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 2, p. 1-19.
- [10] BÜHLMANN, Peter, Petros DRINEAS, Michael KANE a Mark LAAN, ed. *Handbook of Big Data: Statistical Methods*. 11.11.2019. Chapman and Hall/CRC, 2019. ISBN 9780367330736.
- [11] CAGLAR, Tayfun; Teker, Suat. Industrial Revolitions and its Effects on Quality of Life. In *Global Business Research Congress*, 2019. s. 304-311. DOI: 10.17261/Pressacademia.2019.1109.
- [12] ÇENGEL, Yunus A. *Heat Transfer: A Practical Approach*. New York, USA : McGraw-Hill Companies, 2002. 932 s. ISBN 0-07-245893-3, ISBN-13 978-0072458930.
- [13] CLIFFORD, Jerrold; Steven, CLIFFORD; Adelaide, R. RODRIQUEZ. *The Put the YOU in IoT Handbook: Everone's Guide to the Internet of Things*. 21.03.2020. Independently published, 2020. ISBN 978-1700350206.
- [14] CONSTALES, D.; KAČUR, J.; KEER, R. VAN. On the Optimal Cooling Strategy for Variable-Speed Continuous Casting. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING*. 2002, 53, s. 539 - 565. ISSN 1097-0207.

- [15] DOBROVSKÁ, Jana. *Chemická Heterogenita Kovových Slitin*. Ostrava : MONTANEX, 2005. 124 s. ISBN 80-7225-182-1.
- [16] DUSINBERRE, G. M. Numerical Methods for Transient Heat Flows. *Trans. ASME*, 1945. Vol. 67, pp. 703–712.
- [17] Ekholm, Nils. On the Variations of the Climate of the Geological and Historical Past and Their Causes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1901. vol. 27. s. 1-61. ISSN:1477-870X.
- [18] European Environment Agency. Environmental Pressures of Heavy Metal Releases from Europe's Industry. Available online: <https://www.eea.europa.eu/> (accessed on 24 May 2018).
- [19] FRANĚK, Zdeněk. *Vliv tepelných procesů na kvalitu plymule litéch bram a návrh predikce vad*. Ostrava, Czech Republic, 2011. 149 s. Dizertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [20] *Gartner Survey Reveals Digital Twins Are Entering Mainstream Use*. Gartner.com [online]. 2019 [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mai>
- [21] GRIEVES, Michael a John VICKERS. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems (Excerpt)* [online]. 2016, s. 1-7 [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.26367.61609
- [22] GRIFFIN, Emma Alice. *The 'industrial revolution': interpretations from 1830 to the present*. Norwich: UEA, 2022, s. 1-19.
- [23] GONZALEZ, Marcial, et al. Modeling of the Solidification Process in a Continuous Casting Installation for Steel Slabs. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2003, 34, s. 455-473. ISSN :1073-5615.
- [24] HARDIN, R.; DU, P.; BECKERMANN, C. Three-dimensional Simulation of Heat Transfer and Stresses in a Steel Slab Caster. In *METEC InSteelCon 2011 Proceedings*. Düsseldorf, Germany, TEMA Technologie Marketing AG. 2011. s. 6.
- [25] HEGER, Jaromír. *Numerická Simulace Technologického Procesu Kontinuálního Odlévání Oceli*. Ostrava, 2002. 41 s. Habilitační práce. Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava.
- [26] HNÍZDIL, M.; RAUDENSKÝ, M. Influence of Water Temperature on the Cooling Intensity During Continuous Casting and Hot Rolling, *Proceedings of METAL 2012*, 2012, pp. 1–6.
- [27] HOUGHTON, John. *Global Warming: The Complete Briefing*. THIRD EDITION. New York: Cambridge university press, 2004. ISBN 978-0-521-52874-0.
- [28] CHANG, Yun-He, et al. Development and Application of Dynamic Secondary Cooling and Dynamic Soft Reduction Control for Slab Castings. In *METEC InSteelCon 2011 Proceedings*. Düsseldorf, Germany : METEC, 2011. s. 6.
- [29] CHEN, Rong-Hong; HUANG, Yung-Li . Collision of a Liquid Drop on The Edge Region of a Plate Heated Above the Leidenfrost Temperature. *Experiments in Fluids*. 2009, 47, s. 223 – 237. ISSN 0723-4864, EISSN: 1432-1114.
- [30] CHEN, W., et al. Optimization for Secondary Cooling Parameters in Continuous Casting of High Carbon Chromium Bearing Steel. *Advanced Materials Research*. 2009, 83 - 86, s. 465-472. ISSN 1662-8985.
- [31] CHEN, W., et al. Thermo-mechanical Simulation and Parameters Optimization for Beam Blank Continuous Casting. *Materials Science and Engineering A*. 2009, 499, s. 58 - 63. ISSN 0921-5093.

- [32] INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer: FORTH EDITION*. New York, USA : John Wiley & Sons, Inc, 1996. 886 s. ISBN 0-471-30460-3.
- [33] *INICIATIVA PRŮMYSL 4.0* [online]. Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR, 2014, s. 1-233 [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/53723/64358/658713/priloha001.pdf>
- [34] JI, Zhemping, et al. Ant Colony Optimization Based Heat Transfer Coefficient Identification for Secondary Cooling Zone of Continuous Caster. In *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Integration Technology*. Shenzhen, China : IEEE, 2007. s. 558 - 562. ISBN 1-4244-1092-4.
- [35] JI, Zhemping; XIE, Zhi. Multi-objective Optimization of Continuous Casting Billet Based on Ant Colony system Algorithm. In *Computational Intelligence and Industrial Application, 2008. PACIIA '08. Pacific-Asia Workshop on*. Wuhan, Asia : IEEE, 2008. s. 262 - 266. ISBN 978-0-7695-3490-9.
- [36] KAVIČKA, F. et. al. Matematické a experimentální řešení nestacionárního teplotního pole kontinuálně lité bramy. II. Experimentální výzkum teplotního pole. *Hutnické listy*. 2001, č. 6-7, s. 54, ISSN: 0018- 8069.
- [37] KLIMEŠ, L.; BŘEZINA, M.; MAUDER, T.; CHARVÁT, P.; KLEMEŠ, J.; ŠTĚTINA, J. Dry cooling as a way toward minimisation of water consumption in the steel industry: A case study for continuous steel casting. *Journal of Cleaner Production*, 2020. Vol. 275, no. 1, p. 123109-1 (123109-12 p.).
- [38] KORŠEC, Petr, et al. Ant Stigmergy on the Grid: Optimizing the Cooling Process in Continuous Steel Casting. In *Parallel and Distributed Processing Symposium, 2006. IPDPS 2006. 20th International*. Greece : IEEE, 2006. s. 8. ISBN 1-4244-0054-6.
- [39] KÜHN, Wolfgang. Handbook of Digital Enterprise Systems: Digital Twins, Simulation and AI: 1st Edition. 29.05.2019. Book Depository US., 2019. ISBN 13: 978-9811200731.
- [40] LUDWIG, Oliver; ALOE, Marco; THEVOZ Philippe. State of the Art in Modelling of Continuous Casting. In *METEC InSteelCon 2011 Proceedings*. Düsseldorf, Germany, TEMA Technologie Marketing AG. 2011. s. 12.
- [41] MAUDER, Tomáš; CHARVÁT, Pavel; ŠTĚTINA, Josef; KLIMEŠ Lubomír. Assessment of Basic Approaches to Numerical Modeling of Phase Change Problems—Accuracy, Efficiency, and Parallel Decomposition. *Journal of Heat Transfer*. 2017, Volume 139, s 5, <https://doi.org/10.1115/1.4036081>.
- [42] MAUDER, T.; ŠANDERA, Č.; ŠTĚTINA, J. Optimal Control Algorithm for Continuous Casting Process by Using Fuzzy Logic. *STEEL RESEARCH INTERNATIONAL*. 2015, vol. 86, no. 7, s. 785-798. ISSN: 1611-3683, <https://doi.org/10.1002/srin.201400213>.
- [43] MAUDER, T.; ŠTĚTINA, J. High Quality Steel Casting by Using Advanced Mathematical Methods. *Metals*, 2018, vol. 8, no. 12, p. 1-13.
- [44] MAUDER, T.; ŠANDERA, Č.; ŠTĚTINA, J.; ŠEDA, M. Optimization of Quality of Continuously Cast Steel Slabs by Using Firefly Algorithm. *Materiali in tehnologije*, 2011. vol. 45, no. 4, p. 347-350.
- [45] MAUDER, T.; BŘEZINA, M. Reduction of CO2 Emissions in Steelmaking by Means of Utilization of Steel Plant Waste Heat to Stabilize Seasonal Cooling Water Temperature. *Sustainability*, 2021. Vol. 13, no. 11, p. 1-12.
- [46] MIETTINEN, Jyrki. *IDS Solidification Analysis Package for Steels : User manual of DOS version 2.0.0*. Helsinki, Finland : Helsinki University of Technology, 1999. 22 s.

- [47] MINKOWYCZ, W. J.; SPARROW, E. M.; MURTHY, J. Y. *Handbook of Numerical Heat Transfer : Second Edition*. New Jersey, USA : John Wiley & Sons, Inc, 2006. 967 s. ISBN 978-0-471-34878-8.
- [48] MITRA, Sanjit Kumar; James F. KAISER. *Handbook for digital signal processing*. New York: John Wiley, 1993. ISBN 978-0471619956.
- [49] MUHIEDDINE, Mohamad; CANOT, Édouard; MARCH, Ramiro. Various Approaches for Solving Problems in Heat Conduction with Phase Change. *IJFV International Journal On Finite Volumes*. 2006, 3, s. 20. ISSN 1634-0655.
- [50] NAQVI, Al a Mark MUNOZ, ed. *Handbook of Artificial Intelligence and Robotic Process Automation: Policy and Government Applications*. 01.11.2020. London: Athem Press, 2020. ISBN 9781785274954.
- [51] Oláh, J.; Aburumman, N.; Popp, J.; Khan, M.A.; Haddad, H.; Kitukutha, N. Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability* 2020, 12, 4674. <https://doi.org/10.3390/su12114674>
- [52] PAJDO, P. The world's wealthiest responsible for nearly 50% of carbon emissions. *National Ethnic Press and Media Council of Canada* [online]. 2021, 20.12.2021, 1 [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: <https://www.corriere.ca/focus-english-version/the-worlds-wealthiest-responsible-for-nearly-50-of-carbon-emissions/>.
- [53] *PARIS AGREEMENT* [online]. In: . UNITED NATIONS. 2015, s. 1-27 [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- [54] PATERSON, David. *The Origin Story of the PLC* [online]. In: . Control Automation, 2022 [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: <https://control.com/technical-articles/the-origin-story-of-the-plc/>
- [55] PASCON, F.; CESCOTTO, S.; HABRAKEN, A. M. . A 2.5D Finite Element Model for Bending and Straightening in Continuous Casting of Steel Slabs. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING*. 2006, 68, s. 125 - 149. ISSN 1097-0207.
- [56] PASCUAL, Diego Galar, Pasquale DEPONTE a Uday KUMAR. *Handbook of Industry 4.0 and SMART Systems: 1st Edition*. 24.09.2019. CRC Press, 2019. ISBN 9781138316294.
- [57] PENN, J.; PENNERSTORFER, P; JUNGBAUER, A. New Generation of Continuous Casting 409 Plants with Intelligent Manufacturing Strategy. *Berg Huetttenmaenn Monatsh*. 2018, Volume 163, s. 11–17, <https://doi.org/10.1007/s00501-017-0694-4>.
- [58] PEPLOW, Mark. Can industry decarbonize steelmaking?: Major steelmakers and disruptive start-ups look to hydrogen and renewable electricity to make green steel. *Chemical & Engineering News* [online]. 2021, 13.06.2021, 99(22) [cit. 2022-06-08]. Dostupné z: <https://cen.acs.org/environment/green-chemistry/steel-hydrogen-low-co2-startups/99/i22>
- [59] POHANKA, Michal. *Technical Experiment Based Inverse Tasks in Mechanics*. Brno, Czech Republic, 2006. 142 s. Dizertační práce. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering.
- [60] RAUDENSKY, M.; BOHÁČEK, J. Leidenfrost Phenomena at Hot Sprayed Surface. Proceedings of 7th ECI International Conference on Boiling Heat Transfer. 2009, pp. 3–7, <https://doi.org/10.1115/HT2003-47585>.
- [61] RAO, Singiresu S. *Engineering Optimization : Theory and Practice, Fourth Edition*. New Jersey, USA : John Wiley & Sons, Inc, 2009. 813 s. ISBN 978-0-470-18352-6.
- [62] RISSO, J. M.; HUESPE, A. E.; CARADONA, A. Thermal stress evaluation in the steel continuous casting process. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING*. 2005, 65, s. 1355-1377. ISSN 0029-5981.

- [63] SANTILLANA, Begoña, et al. Thermal Analysis of Commercial Steel Grades. In *METEC InSteelCon 2011 Proceedings*. Düsseldorf, Germany, TEMA Technologie Marketing AG. 2011. s. 6.
- [64] SANTOS, C. A.; SPIM, J. A.; GARCIA, A. Mathematical Modeling and Optimization Strategies (Genetic Algorithm and Knowledge Base) Applied to the Continuous Casting of Steel. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2003, 16, s. 511 - 527. ISSN 0952-1976.
- [65] SEDLÁK, Michal. Miliardy na unikátní technologii. Liberty Ostrava má být ocelářským lídrem. *Deník.cz* [online]. 2020, 1 [cit. 2022-06-06]. Dostupné z: <https://www.denik.cz/ekonomika/gfg-alliance-chce-do-liberty-ostava-investovat-19-miliard-korun-20200219.html>.
- [66] SPUY, D. deV. Van Der; CRAIG, I. K.; PISTORIUS, P. C. An Optimization Procedure for the Secondary Cooling Zone of a Continuous Billet Caster. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1999, 99-01, s. 49 - 56. ISSN 0038-223X.
- [67] STEFANESCU, Doru Michael. *Science and Engineering of Casting Solidification*. New York, USA : Springer Science, 2009. 402 s. ISBN 978-0-387-74609-8.
- [68] SUZUKI, H.G.; ELYON, D. Hot ductility of titanium alloy: A challenge for continuous casting process. *Materials Science and Engineering: A*. 1998, Volume 243, Issues 1–2, s. 126-133, [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00789-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00789-2).
- [69] ŠTĚTINA, Josef. *Dynamický Model Teplotního Pole Plynu Odlévané Bramy*. Ostrava, Czech Republic, 2007. 105 s. Dizertační práce. Technická univerzita Ostrava.
- [70] VOLLER, V. An Explicit Numerical Method to Track a Moving Phase Change Front. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1983. Vol. 26,(1), pp. 147–150.
- [71] WANG, Hongming, et al. Mathematical Heat Transfer Model Research for the Improvement of Continuous Casting Slab Temperature. *ISIJ International*. 2005, 45, s. 1291 - 1296. ISSN 0915-1559, eISSN 1347-5460.
- [72] WORAPRADYA, Kiatkajohn; THANAKIJKASEM, Purit. Optimum Spray Cooling in Continuous Slab Casting Process under Productivity Improvement. In *Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IEEM 2009. IEEE International Conference on*. Hong Kong : IEEE, 2009. s. 120 - 124. ISBN 978-1-4244-4869-2.
- [73] *World Steel in Figures, 2020*. World steel association. Brussels, Belgium, 2020.
- [74] World Steel Association. The White Book of Steel; Pyramidion.be. 2012. Available online: <http://www.voestalpine.com/> (accessed on 11 September 2019).
- [75] WU, Guo-Hua; WU, RONG-Yang. Identification of Convection Heat Transfer Coefficient Parameters Based on Hybrid Particle Swarm Algorithm in the Secondary Cooling Zone for Steel Continuous Casting Process. In *Computational Intelligence Methods and Applications, 2005 ICSC Congress on*. Istanbul, Turkey : IEEE, 2005. s. 6. ISBN 1-4244-0020-1.
- [76] YANG, Won Y., et al. *Applied Numerical Methods Using Matlab®*. New Jersey, USA : John Wiley & Sons, Inc, 2005. 509 s. ISBN 0-471-69833-4.
- [77] YANG, Xin-She. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*. Second Edition. United Kingdom : Luniver Press, 2010. 150 s. ISBN 978-1-905986-28-6.
- [78] ZADEH, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control* 8 (3). 1965. pp. 338–353. DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X. ISSN 0019-9958.
- [79] ZHANG, J.; CHEN, D.F.; ZHANG, C.Q.; WANG, S.G.; HWANG, W.S.; HAN, M.R. Effects of an even secondary cooling mode on the temperature and stress fields of round billet continuous casting steel. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015, Volume 222, s 315-326, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.022>

Digitální dvojče plynulého odlévání oceli a jeho optimalizace

Abstrakt

Digitální dvojče jako matematicko-numerický model ZPO (zařízení pro plynulé odlévání oceli), jeho tvorba i optimalizace je moderní klíčový nástroj k dosažení požadované kvality odlévané oceli a produktivity výroby. Simuluje vlastní výrobní proces na ZPO a zohledňuje aspekty produkce oceli včetně její kvality a včetně ekologických dopadů na životní prostředí. Práce dokládá význam digitálního modelu reálného procesu plynulého lití a metod numerické matematiky při jeho tvorbě. Optimalizace reálného provozu ZPO se provede optimalizací parametrů jejího digitálního dvojčete. Výsledkem je nejen ukázka implementace předloženého algoritmu a souhrn aplikačních možností navrhovaného přístupu ale především verifikovaný plnohodnotný digitální obraz skutečného lícího stroje a důkaz jeho možnosti prediktivně reagovat na dynamické změny lícího procesu a dosáhnout maximální produkce při dodržení výsledné kvality oceli i zvyšujících se ekologických požadavků.

Summary

The digital twin as a mathematical-numerical model of CC (continuous steel casting) process and its optimization is a modern tool to achieve the required steel quality and high productivity of casting. Described digital twin simulates production process at CC and considers main aspects of steel production, including its quality and environmental impact. This work demonstrates the importance of a digital model of a real process and methods of numerical mathematics used on its creation. The optimization of real CC operation is performed by optimizing the digital twin parameters. The results conclude verified full digital image of a real CC process, demonstration of the model implementations, application possibilities and its ability to predictively change dynamic casting process parameters to achieve maximum production and high steel quality products with respect to increasing environmental requirements.